

**Misturas Betuminosas Temperadas, do tipo SMA,
com Incorporação de Material Betuminoso Reciclado
e Fibras Celulósicas – Contribuição para a sua
Caracterização**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil – Especialização em Construção Urbana

Autor

Daniela Sofia Campos Antunes

Orientador

Prof. Doutor Silvino Dias Capitão

Professor Coordenador do DEC-ISEC

Coimbra, dezembro de 2014

"Nem todos podem tirar um curso superior. Mas todos podem ter respeito, alta escala de valores e as qualidades de espírito que são a verdadeira riqueza de qualquer pessoa."

Alfred Armand Montaper

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível com ajuda e colaboração de diversos intervenientes a quem pretendo expressar os meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor Doutor Silvino Dias Capitão, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pela orientação científica deste trabalho, pelos seus ensinamentos e recomendações, pela sua dedicação e constante disponibilidade e pelo apoio e amizade demonstrada. Agradeço ainda pelos esforços desenvolvidos no sentido de mobilizar todos os recursos necessários para a realização dos trabalhos laboratoriais.

À empresa Contec, na pessoa da Engenheira Filipa Gomes, pelo fornecimento do material fresado e do betume e à empresa JRS, na pessoa do Doutor Fernando Martinho, pelo fornecimento das fibras celulósicas.

Ao Engenheiro Técnico Carlos Renato, técnico do Laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pela sua preciosa ajuda na realização dos ensaios laboratoriais, e ainda pela sua boa disposição, uma constante ao longo de todo este período.

Expresso também o meu agradecimento ao Senhor Celestino Marques, técnico do Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, pela colaboração prestada na realização de alguns trabalhos laboratoriais.

A todos os meus colegas e amigos que me acompanharam ao longo de todo este percurso académico, com especial agradecimento à Isabela, Marisa, Sofia e Mariano, que sempre me animaram e apoiaram ao longo de toda esta caminhada.

Ao Ricardo, pelo carinho, apoio e compreensão demonstrada, e à Andreia, amiga de longa data, pela infindável amizade e companheirismo.

Agradeço ainda, à minha irmã Cláudia pelos seus preciosos conhecimentos informáticos, e pela amizade e motivação transmitida.

Para terminar, gostaria de manifestar a minha enorme gratidão aos meus pais e às minhas tias, pelo seu apoio incondicional e por sempre me proporcionarem as melhores condições possíveis ao longo do meu percurso académico, pois sem eles este trabalho nunca seria possível.

Daniela Sofia Campos Antunes

Coimbra, dezembro de 2014

RESUMO

A crescente necessidade de reabilitação de pavimentos rodoviários tem conduzido ao aumento dos materiais resultantes das intervenções e ao consumo de quantidades significativas de energia e de novos materiais.

Uma das formas de reduzir o consumo de energia decorrente da execução de trabalhos de reabilitação, e consequentemente a emissão de gases poluentes associada, é a produção de Misturas Betuminosas Temperadas. Estas são produzidas a temperaturas inferiores a 140°C, o que permite poupar energia em relação às fabricadas a quente a uma temperatura superior a 140°C.

Por outro lado, a adição de Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR) na produção de novas misturas, em substituição de parte dos agregados naturais e do betume novo, contribui para a diminuição do consumo de novos materiais, o que constitui uma prática ambientalmente sustentável e economicamente vantajosa.

Reunindo os aspetos referidos no fabrico de misturas *Stone Mastic Asphalt* (SMA), caracterizadas pela sua elevada durabilidade e baixo custo de manutenção ao longo do seu ciclo de vida, pode obter-se uma mistura com inúmeras vantagens do ponto de vista económico e ambiental, destacando-se a redução do consumo e do custo de matérias-primas naturais, a redução do volume de resíduos a transportar a vazadouro, a redução do consumo de energia e a redução dos custos na manutenção e reabilitação dos pavimentos.

Ao longo deste trabalho, descrevem-se as diversas tecnologias usadas para produzir misturas betuminosas temperadas, caracterizam-se as misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt*, e mencionam-se os aspetos mais relevantes na incorporação de MBR na produção de novas misturas.

Por último, foram realizados estudos experimentais com o intuito de investigar as propriedades volumétricas e o comportamento mecânico de misturas temperadas do tipo SMA com incorporação de MBR, contribuindo para o desenvolvimento deste tipo de misturas não tradicionais, com o objetivo de promover a sua utilização futura em trabalhos de pavimentação rodoviária.

Palavras-Chave

Misturas Betuminosas Temperadas; Aditivos; Fibras Celulósicas; Ambiente; Economia; Aquecimento Global; Misturas Betuminosas Recuperadas; Reciclagem; *Stone Mastic Asphalt* (SMA); Sustentabilidade; Formulação de Misturas Betuminosas; Propriedades das Misturas Betuminosas.

ABSTRACT

The constant growth of rehabilitation of road pavements has resulted in increasing amounts of materials resulting from the interventions and the consumption of significant amounts of energy and new materials.

One way of reducing the energy consumption, which arises from the rehabilitation works, and the consequent greenhouse gas emissions associated to it, is the production of Warm Mix Asphalt (WMA). This is produced at temperatures below 140°C, which saves energy when compared to asphalts produced at a temperature higher than 140°C.

On the other hand, the addition of Recycled Asphalt Pavement (RAP) in the production of new mixtures, replacing natural aggregates and new binder, contributes to reducing the consumption of new materials, which is an environmentally sustainable and economically viable option.

Bringing together the aspects mentioned into the production of Stone Mastic Asphalt (SMA), which are characterized by its high durability and low maintenance costs over its lifecycle, a mixture with large economic and environmental benefits can be obtained, emphasizing the reduction of consumption and cost of natural raw materials, the reduction of the waste volume to be transported to dump, the reduction of energy consumption and the reduction of pavements maintenance and rehabilitation costs.

Throughout this study the different technologies used to produce Warm Mix Asphalt are described, Stone Mastic Asphalt mixtures are characterized, and the most relevant aspects concerning the incorporating of RAP in the production process of new mixtures are mentioned.

Finally, experimental studies were carried out in order to find the volumetric properties and mechanical behaviour of SMA warm mixtures incorporating RAP, aiming to contribute to the development of this type of non-traditional mixtures and promote its future application in road pavement works.

Key-words

Warm Mix Asphalt (WMA); Additives; Cellulose Fibers; Environment; Economy; Global Warming; Recycled Asphalt Pavement (RAP); Recycling; Stone Mastic Asphalt (SMA); Sustainability; Bituminous Mixtures Design; Properties of Bituminous Mixtures.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos e Metodologia de Trabalho	2
1.3	Organização do Trabalho	3
2	MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS.....	5
2.1	Enquadramento.....	5
2.2	Características das Misturas Betuminosas Temperadas (MBT).....	7
2.3	Mecanismos Envolvidos na Redução da Temperatura.....	8
2.3.1	Aditivos Orgânicos.....	9
2.3.2	Aditivos Químicos.....	12
2.3.3	Espuma de Betume	14
2.4	Benefícios das Misturas Betuminosas Temperadas.....	17
2.4.1	Benefícios Ambientais	17
2.4.2	Benefícios Económicos	18
2.4.3	Benefícios na Aplicação.....	18
2.4.4	Benefício para os Trabalhadores da Via e Populações Circunvizinhas.....	18
2.5	Desvantagens das Misturas Betuminosas Temperadas.....	19
2.6	Misturas Betuminosas Recicladas	20
2.7	Misturas Betuminosas Temperadas (MBT) com Incorporação de Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR).....	22
2.8	Considerações Finais	23
3	MISTURAS BETUMINOSAS do tipo SMA – <i>Stone Mastic Asphalt</i>	25
3.1	Enquadramento.....	25
3.2	Aspetos Relacionados com a Composição da Mistura	28
3.2.1	Generalidades	28
3.2.2	Esqueleto do Agregado	29
3.2.3	Mástique Betuminoso.....	30
3.2.4	Escorrimento do Ligante	31
3.2.5	Fibras Celulósicas	31
3.3	Características de Desempenho de Misturas Betuminosas do Tipo SMA	33
3.4	Desvantagens da Mistura Betuminosa SMA	35
3.5	Durabilidade	37

3.6	Fabrico e Aplicação das Misturas do tipo SMA	38
3.7	A Utilização de SMA em Portugal	39
3.8	Considerações Finais	41
4	ESTUDO LABORATORIAL DE UMA MBT, DO TIPO SMA, COM MBR	42
4.1	Enquadramento	42
4.2	Propriedades dos Materiais Constituintes	42
4.2.1	Materiais Granulares.....	42
4.2.2	Mistura Betuminosa Recuperada (MBR)	45
4.2.3	Betume Asfáltico	51
4.2.4	Aditivo	51
4.3	Estudo da Mistura de Agregados	52
4.4	Fabrico da Mistura e Moldagem de Provetes	58
4.4.1	Provetes Cilíndricos.....	61
4.4.2	Lajetas.....	62
4.5	Caracterização Volumétrica e Avaliação do Escorrimento pelo Método de <i>Schellenberg</i>	63
4.5.1	Propriedades Volumétricas	63
4.5.2	Percentagem Ótima de Betume	71
4.5.3	Ensaio para Avaliação do Escorrimento pelo Método de <i>Schellenberg</i>	71
4.5.4	Propriedades Volumétricas da Mistura Formulada para 4% de Porosidade.....	74
4.6	Avaliação de Características Mecânicas	75
4.6.1	Ensaio de Compressão de Marshall	75
4.6.2	Avaliação da Sensibilidade à Água	77
4.6.3	Módulos de Rigidez Medidos em Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral.....	79
4.6.4	Resistência à Deformação Permanente em Ensaio Wheel-Tracking	83
4.7	Comparação das Características da Mistura de Estudo com as Obtidas em Estudos Similares e Especificações Existentes.....	90
4.7.1	Propriedades Volumétricas.....	90
4.7.2	Caraterísticas Mecânicas	92
4.8	Considerações Finais	95
5	CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS.....	96
5.1	Síntese do Trabalho e Conclusões Gerais.....	96
5.2	Prosseguimentos de Trabalhos Futuros	100
5.3	Considerações Finais	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	REFERÊNCIAS NORMATIVAS.....	105
	APÊNDICES.....	107

APÊNDICE I. Estudo dos Agregados.....	108
I.1 Análise granulométrica	108
I.2 Estudo da mistura de agregados	107
I.3 Massa Volúmica.....	114
 APÊNDICE II. Estudo da Mistura Betuminosa	 118
II.1 Estudo de Mistura Betuminosa – Composição de Provetes Marshall e Lajetas para ensaio Wheel-tracking	118
II.2 Estudo de Mistura Betuminosa – Propriedades Volumétricas	120
II.3 Estudo de Mistura Betuminosa – Compressão de Marshall.....	122
II.4 Estudo de Mistura Betuminosa – Sensibilidade à água.....	123
II.5 Estudo de Mistura Betuminosa – Características das lajetas.....	127
 APÊNDICE III. Resultados Gráficos	 128
III.1 Estabilidade Marshall.....	128
III.2 Ensaaios de Tração Indireta	137

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas em função da temperatura de fabrico (Barbosa, 2012).	8
Figura 2.2 – Aditivo orgânico – Sasobit® (Prowell et al, 2011)	10
Figura 2.3 – Aditivo orgânico – Shell Thiopave™ (Prowell et al, 2011)	10
Figura 2.4 – Aditivo orgânico – Asphaltan B® (MMAC, 2010)	10
Figura 2.5 – Viatop CT 40® [adaptado de (MMAC, 2010; Alibaba, 2014)]	11
Figura 2.6 – Aditivo químico – Rediset™ WMX (MMAC, 2010)	12
Figura 2.7 – Aditivo químico – Cecabase® TA (Pereira, 2010)	13
Figura 2.8 – Unidade de produção de espuma [adaptado de (EAPA, 2010)]	14
Figura 2.9 – Estrutura molecular de um zeólito	15
Figura 2.10 – Equipamento de adição simultânea dos zeólitos e do betume	16
[adaptado de (Prowell et al, 2011)]	16
Figura 2.11 – Zeólitos sintéticos Aspha-min® (esquerda) e Advera® (direita) (MMAC, 2010)	16
Figura 2.12 – Determinação da percentagem ótima de betume nas MBQ com MBR (Antunes et al, 2009; Martinho, 2013)	22
Figura 3.1 – Estrutura de um pavimento flexível [adaptado de (Fonseca, 2011)]	26
Figura 3.2 – Aspeto da estrutura interna de algumas misturas das mais utilizadas na Europa (EAPA, 2007)	27
Figura 3.3 – Constituintes de uma mistura tipo do SMA [adaptado de (Júnior, 2008)]	28
Figura 3.4 – Repartição de cargas entre as partículas de agregado grosso (Batista et al, 2012)	29
Figura 3.5 – Aspeto típico da superfície da mistura SMA (Júnior, 2008)	29
Figura 3.6 – Esqueleto interno SMA [adaptado de (Júnior, 2008)]	30
Figura 3.7 – Escorrimento do betume – SMA sem fibras [adaptado de (Júnior, 2008) e (Martinho et al, 2013 a)]	31
Figura 3.8 – Fibras Celulósicas: a) dispersas (soltas); b) em granulado [adaptado de (Alibaba, 2014; Junquiá, 2013)]	32
Figura 3.9 – Granulado de fibras de celulose: a) revestidas com betume – Viatop Premium®; b) revestidas com uma cera orgânica (Sasobit®) – Viatop CT 40® (Alibaba, 2014)	32
Figura 3.10 – Exsudação do ligante betuminoso (Fonseca, 2011)	36
Figura 3.11 – Durabilidade média de diversas misturas utilizadas a nível europeu (EAPA, 2007)	37
Figura 4.1 – Agregados naturais utilizados na mistura	43
Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos agregados naturais em estudo	43
Figura 4.3 – Mistura Betuminosa Recuperada proveniente da camada superficial de um troço da autoestrada A13	46

Figura 4.4 – Equipamento utilizado na determinação da percentagem de betume e aspeto geral do material ensaiado.....	46
Figura 4.5 – Conjunto de peneiros (esquerda), peneirador automático (centro) e peneiração manual (direita).....	47
Figura 4.6 – Curvas granulométricas do agregado da MBR	48
Figura 4.7 – Amostra do Agregado da MBR: a) referente à fração 8/16 mm; b) referente à fração 0/8 mm	49
Figura 4.8 – Curvas granulométricas do agregado da MBR – Frações 8/16 e 0/8 mm.....	49
Figura 4.9 – Viatop CT 40®	51
Figura 4.10 – Limites granulométricos protagonizados na EN 13108-5.....	53
Figura 4.11 – Tentativas para obtenção de uma mistura com um esqueleto de agregado típico de uma mistura do tipo SMA.....	53
Figura 4.12 – Aspeto final da estrutura da mistura (SMA), em estudo nesta dissertação.....	54
Figura 4.13 – Granulometria da mistura em estudo (SMA 12,5) em comparação com os limites definidos na EN 13108-5.....	55
Figura 4.14 – Comparação entre os limites granulométricos definidos no projeto NCHRP 9-8 e na EN 13108-5 com a granulometria da mistura final	56
Figura 4.15 – Comparação entre os limites granulométricos definidos na especificação da AASHTO e na EN 13108-5 com a granulometria da mistura final	56
Figura 4.16 – Comparação entre os limites granulométricos definidos na Proposta Espanhola e na EN 13108-5 com a granulometria da mistura final	57
Figura 4.17 – Comparação entre os limites granulométricos definidos na Alemanha e na EN 13108-5 com a granulometria da mistura final.....	57
Figura 4.18 – Comparação entre os limites granulométricos definidos na Suécia e na EN 13108-5 com a granulometria da mistura final.....	58
Figura 4.19 – Produção da mistura betuminosa	60
Figura 4.20 – Moldagem de provetes cilíndricos	61
Figura 4.21 – Moldagem de lajetas	62
Figura 4.22 – Determinação da baridade aparente dos provetes.....	64
Figura 4.24 – Representação gráfica da variação da porosidade para cada percentagem de betume....	71
Figura 4.25 – Recipiente de vidro utilizado no ensaio (esquerda) e mistura colocada no interior do recipiente para posterior colocação dentro de estufa (direita).....	72
Figura 4.26 – Material retido no interior do copo	72
Figura 4.27 – Representação gráfica das propriedades volumétricas para as várias percentagens de betume	74
Figura 4.28 – Ensaio de compressão de Marshall	75
Figura 4.29 – Resultados obtidos nos ensaios de compressão Marshall	76
Figura 4.30 – Tração indireta de provetes para avaliação de sensibilidade à água	78
Figura 4.31 – Princípios verificados no ensaio de tração indireta por compressão diametral: a) Carregamento e deformação; b) curvas de força e deformação	80
Figura 4.32 – Representação gráfica dos valores de módulo de rigidez obtidos a 20°C em função da percentagem de betume	81
Figura 4.33 – Representação gráfica dos valores de deformação obtidos em função da percentagem de betume	81

Figura 4.34 – Comparação de módulos de rigidez obtidos em ensaios de tração indireta por compressão diametral (Mokhtari et al, 2012; Neves et al, 2006)	82
Figura 4.35 – Equipamento para determinar a resistência à deformação permanente – wheel-tracking (Martinho, 2013).....	83
Figura 4.36 – Gráfico de resultados, RD_{AIR} , dos ensaios de Wheel-Tracking realizados a 60°C.....	84
Figura 4.37 – Variação da extensão axial permanente acumulada com a percentagem de betume (Ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas).....	85
Figura 4.38 – Comparação do valor médio da extensão axial permanente medido em ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas com os apresentados por outras misturas.....	86
Figura 4.39 – Variação da média da profundidade de cavado de rodeira com a percentagem de betume (Ensaio de wheel-tracking).....	87
Figura 4.40 – Relação entre a deformação do ensaio de wheel-tracking, RD_{AIR} , e a extensão axial permanente acumulada média do ensaio de compressão uniaxial cíclico, ϵ_{3600}	88
Figura 4.41 – Relação entre a taxa de deformação do ensaio de wheel-tracking, WTS_{AIR} , e a velocidade de deformação média do ensaio de compressão uniaxial cíclico, f	88
Figura 4.42 – Aspeto das lajetas após ensaios de wheel-tracking	89

ÍNDICE DE FIGURAS EM APÊNDICE

Figura I.1 - Curvas granulométricas dos agregados	113
Figura III.1 – Estabilidade Marshall Provete 2.2 – Percentagem de betume 6,0%	128
Figura III.1 – Estabilidade Marshall Provete 2.3 – Percentagem de betume 6,0%	129
Figura III.2 – Estabilidade Marshall Provete 2.4 – Percentagem de betume 6,0%	130
Figura III.3 – Estabilidade Marshall Provete 3.2 – Percentagem de betume 6,5%	131
Figura III.4 – Estabilidade Marshall Provete 3.3 – Percentagem de betume 6,5%	132
Figura III.5 – Estabilidade Marshall Provete 3.4 – Percentagem de betume 6,5%	133
Figura III.6 – Estabilidade Marshall Provete 4.1 – Percentagem de betume 7,0%	134
Figura III.7 – Estabilidade Marshall Provete 4.2 – Percentagem de betume 7,0%	135
Figura III.8 – Estabilidade Marshall Provete 4.3 – Percentagem de betume 7,0%	136
Figura III.9 – Tração Indireta em provete seco sa1 – Percentagem de betume 6,3 %	137
Figura III.10 – Tração Indireta em provete seco sa2 – Percentagem de betume 6,3 %	138
Figura III.11 – Tração Indireta em provete seco sa3 – Percentagem de betume 6,3 %	139
Figura III.12 – Tração Indireta em provete imerso sa6 – Percentagem de betume 6,3 %	140
Figura III.13 – Tração Indireta em provete imerso sa7 – Percentagem de betume 6,3 %	141
Figura III.14 – Tração Indireta em provete imerso sa8 – Percentagem de betume 6,3 %	142

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Dados relativos à redução de emissões com Misturas Betuminosas Temperadas, em percentagem [adaptado de (FHWA, 2008; Powell et al, 2011)].....	17
Quadro 2.2 – Principais técnicas de Reciclagem (adaptado de Batista, 2006).....	21
Quadro 3.1 – Percentagem ponderal de fibras na mistura do tipo SMA	33
Quadro 4.1– Granulometria dos materiais granulares usados na formulação da mistura	44
Quadro 4.2– Características físicas dos agregados de granulometria 4/12,5 mm	44
Quadro 4.3– Características físicas dos agregados de granulometria 0/4 mm	45
Quadro 4.4– Características do filler utilizado.....	45
Quadro 4.5 – Percentagem de betume de três amostras da MBR.....	47
Quadro 4.6 – Massa volúmica dos agregados da fração 0/8 da MBR com ponderação dos valores obtidos para partículas inferiores e superiores a 4 mm.....	50
Quadro 4.7 - Massa volúmica dos agregados da fração 8/16 da MBR com ponderação dos valores obtidos para partículas inferiores e superiores a 4 mm.....	50
Quadro 4.8 – Características do betume 35/50.....	51
Quadro 4.9 – Características do Viatop CT 40®	52
Quadro 4.10 – Limites da composição [adaptado de (EN 13108-5:2006)]	52
Quadro 4.11 – Percentagem de cada fração de agregado contido na mistura de agregado	54
Quadro 4.12 – Densidade da água em função da sua temperatura (EN 12697-6).....	65
Quadro 4.13 – Valores médios das baridade dos provetes	66
Quadro 4.14 – Baridade máxima teórica da mistura (calculada).....	67
Quadro 4.15 – Baridade máxima teórica	69
Quadro 4.16 – Porosidade, VMA e VFB dos provetes.....	70
Quadro 4.17 – Propriedades volumétricas da mistura SMA 12,5, formulada para 4% de porosidade..	75
Quadro 4.18 – Resultados obtidos nos ensaios de Marshall para a mistura SMA 12,5, formulada para 4% de porosidade	77
Quadro 4.19 – Definição das categorias de valores de ITSR relativas ao ensaio de sensibilidade à água (EN 13108-1).....	79
Quadro 4.20 – Condições de ensaio	80
Quadro 4.21 – Valores de profundidade de rodeira (PRD_{AIR}) e de taxa média de deformação ao ar (WTS_{AIR}).....	85
Quadro 4.22 – Comparação das propriedades volumétricas obtidas com valores definidos em especificações.....	90
Quadro 4.23 – Comparação das propriedades volumétricas da mistura em estudo com as obtidas em misturas similares	91
Quadro 4.24 – Comparação das características mecânicas obtidas com valores definidos em especificações e trabalhos publicados para mistura AC 14 surf (BB).....	92
Quadro 4.25 – Comparação das características mecânicas da mistura em estudo com as obtidas em misturas similares	94

ÍNDICE DE QUADROS EM APÊNDICE

Quadro I.1 – Valores obtidos da análise granulométrica do agregado da MBR – Amostra 1	108
Quadro I.2 – Valores obtidos da análise granulométrica do agregado da MBR – Amostra 2	109
Quadro I.3 – Valores obtidos da análise granulométrica do agregado da MBR – Amostra 3	109
Quadro I.4 – Valores obtidos da análise granulométrica do agregado da MBR – Valores médios	110
Quadro I.5 – Valores obtidos da análise granulométrica do agregado da Fração 8/16 mm da MBR .	110
Quadro I.6 – Valores obtidos da análise granulométrica do agregado da Fração 0/8 mm da MBR ...	111
Quadro I.7 – Mistura de agregados para a formulação da mistura betuminosa	107
Quadro I.8 - Determinação da massa volúmica dos agregados da fração 0/8 da MBR pelo método do picnómetro (partículas inferiores a 4 mm)	114
Quadro I.9 - Determinação da massa volúmica dos agregados da fração 0/8 da MBR pelo método do cesto de rede metálica (partículas superiores a 4 mm)	114
Quadro I.10 - Massa volúmica dos agregados da fração 0/8 da MBR com ponderação dos valores obtidos para partículas inferiores e superiores a 4 mm	115
Quadro I.11 - Determinação da massa volúmica dos agregados da fração 8/16 da MBR pelo método do picnómetro (partículas inferiores a 4 mm)	115
Quadro I.12 - Determinação da massa volúmica dos agregados da fração 8/16 da MBR pelo método do cesto de rede metálica (partículas superiores a 4 mm)	115
Quadro I.13 - Massa volúmica dos agregados da fração 8/16 da MBR com ponderação dos valores obtidos para partículas inferiores e superiores a 4 mm	116
Quadro II.1 – Composição dos provetes Marshall	118
Quadro II.2 – Composição das lajetas.....	118
Quadro II.3 – Massas volúmicas dos materiais utilizados na mistura.....	119
Quadro II.4 – Características Volumétricas dos provetes Marshall	120
Quadro II.5 – Características dos provetes Marshall	121
Quadro II.6 – Resultados do ensaio de Compressão de Marshall	122
Quadro II.7 – Composição dos provetes Marshall	123
Quadro II.8 – Características dos provetes Marshall para o ensaio de avaliação da sensibilidade à água	124
Quadro II.9 – Resultados do ensaio de tração indireta e determinação de ITRS	125
Quadro II.10 – Características das lajetas realizadas	127

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AC – *Asphalt Concrete*

AC – TL/BBTM – *Asphalt Concrete – Thin Layers / Béton Bitumineux Très Mince*

BB – Betão Betuminoso

D – Dimensão máxima do agregado

d – Dimensão mínima do agregado

d_{5 000}; 10 000 – Profundidade de rodeira (no ensaio wheel-tracking) ao fim de 5 000 ou 10 000 ciclos

ε₃₆₀₀ – Extensão permanente acumulada ao fim de 3600 ciclos de carga

EAPA – *European Asphalt Pavement Association*

EN – *European Norm* (Norma Europeia)

EP – Estradas de Portugal

et al. – *et alii* (e outros)

EUA – Estados Unidos da América

f – Velocidade de deformação ou taxa de fluência

FHWA – *Federal Highway Administration*

FI – Índice de achatamento dos materiais granulares

GEE – Gases com Efeito de Estufa

ITSR – Índice de resistência conservada em tração indireta (*Indirect Tensile Strength Ratio*)

LEA – *Low Energy Asphalt*

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MB_F – Valor de azul metileno

MBQ – Mistura Betuminosa fabricada a Quente

MBR – Mistura Betuminosa Recuperada

MBT – Mistura Betuminosa Temperada

M_{DE} – Coeficiente *micro-Deval*

NAPA – *National Asphalt Pavement Association*

NCHRP – *National Cooperative Highway Research Program*

ND – Não Determinado

NP – Norma Portuguesa

PA – *Porous Asphalt*

PRD_{AIR} – Percentagem da Profundidade da Rodeira, ao fim de N ciclos (*proportional rut depth*)

PSV – *Polished Stone Value*

RAP – *Recycled Asphalt Pavement*

RD_{AIR} – Profundidade da Rodeira, ao fim de N ciclos (*rut depth*)

SI – Índice de forma dos materiais granulares

SMA – *Stone Mastic Asphalt*

VCI – Via de Cintura Interna

VFB – Volume de vazios preenchidos por betume (*Voids Filled with Binder*)

VMA – Volume de vazios na Mistura de Agregados

WA – Categoria para a absorção de água dos materiais granulares

WTS_{AIR} – Taxa de deformação em ensaio de pista (*wheel tracking slope*)

ρ_a – Massa volúmica do material impermeável das partículas

ρ_{bsea} – Baridade de um provete, ou carote, de mistura betuminosa, com superfície selada

ρ_{mc} – Baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa determinada pelo procedimento matemático

ρ_{mv} – Baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa determinada pelo procedimento volumétrico

ρ_{rd} – Massa volúmica das partículas secas em estufa

ρ_{sm} – Massa volúmica do material de selagem à temperatura do ensaio

ρ_{ssd} – Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca

ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura do ensaio

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A crescente preocupação de ordem ambiental e ecológica tem sido uma constante ao longo dos últimos anos, influenciando o comportamento de alguns setores, nomeadamente, os da construção. Neste contexto têm sido estudadas diversas alterações no domínio dos pavimentos rodoviários, particularmente nos processos produtivos de misturas betuminosas, no sentido de diminuir os impactos ambientais sem por em causa o desempenho técnico.

As Misturas Betuminosas fabricadas a Quente (MBQ), utilizadas na maioria das obras de construção e reabilitação de pavimentos rodoviários, são responsáveis por um grande consumo de energia e consequentemente por uma parcela significativa da emissão de gases para a atmosfera, devido à elevada temperatura necessária à sua produção e aplicação em obra. Deste modo, é importante mitigar estes aspetos negativos através da introdução de melhorias significativas em todo o processo de fabrico de misturas betuminosas.

É neste seguimento que surgem as misturas betuminosas temperadas (MBT), caracterizadas principalmente pela diminuição do consumo de energia e da poluição em todo o processo de fabrico. Os seus inúmeros benefícios do ponto de vista ambiental e económico têm potenciado o seu crescente desenvolvimento.

Além disso, a reutilização de resíduos provenientes de várias atividades indústrias está a ser fomentada em resposta às preocupações de ordem ambiental e também por razões de economia. A incorporação de Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR) na produção de novas betuminosas é uma prática promissora e tem sido cada vez mais incentivada com o objetivo de reduzir o consumo de novos materiais granulares e o aumento de materiais existentes degradados a levar a vazadouro, sendo, deste modo, uma prática económica e ambientalmente correta.

Por outro lado, tem-se verificado um esforço crescente no âmbito da investigação sobre pavimentos rodoviários procurando alcançar soluções que apresentem para além de boas características funcionais e estruturais, elevada durabilidade e baixo custo de manutenção. É com esse objetivo, que tem sido desenvolvido nas últimas décadas o conhecimento sobre o comportamento mecânico das camadas constituintes do pavimento, de modo a obter pavimentos com desempenho superior ao convencional e maior vida útil.

No seguimento das preocupações enunciadas, destacam-se as misturas betuminosas designadas por SMA - *Stone Mastic Asphalt* aplicadas ao nível da camada de desgaste,

caracterizadas pela sua capacidade de resistência. São especialmente indicadas para aplicação em vias urbanas com tráfego de pesados, zonas com tráfego elevado e/ ou pesado, zonas com elevadas inclinações, zonas de travagem e/ou torção, em viadutos e túneis.

Esta dissertação pretende contribuir para o estudo da caracterização de uma mistura betuminosa inovadora, que reúne todos os aspetos e tecnologias acima referidos, podendo constituir deste modo, uma solução que alia a sustentabilidade a uma elevada durabilidade.

1.2 Objetivos e Metodologia de Trabalho

O objetivo principal desta dissertação é contribuir para a caracterização volumétrica e mecânica de uma MBT, do tipo SMA, com incorporação de MBR e fibras celulósicas, de modo a que esta se possa constituir como uma alternativa válida às misturas tradicionais, para uso em camada de desgaste.

Esta dissertação procura também dar um contributo para o desenvolvimento do conhecimento de misturas betuminosas mais sustentáveis, reunindo alguns dos temas considerados mais importantes na indústria da construção de pavimentos, nomeadamente, a reciclagem de materiais, a reutilização de subprodutos, a redução do consumo de energia e da libertação de emissões (Martinho, 2014).

No que diz respeito à metodologia de trabalho, numa primeira fase procurou dar-se uma visão global dos conceitos mais importantes relacionados com as misturas betuminosas temperadas. Numa segunda fase é realizada uma revisão do estado da arte das misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt*.

Os trabalhos experimentais tiveram como objetivo, por uma lado, a caracterização dos materiais constituintes da mistura e, por outro lado, o estudo da mistura produzida para diferentes percentagens de betume. Após a determinação da percentagem ótima de betume foi fabricada a composição final da mistura e avaliadas algumas das suas características mecânicas.

De modo a produzir uma análise mais clara do comportamento da mistura betuminosa produzida, foram comparados os resultados laboratoriais obtidos com valores típicos de outras misturas betuminosas convencionais e de outras comparáveis.

1.3 Organização do Trabalho

A dissertação é constituída por cinco capítulos e três apêndices cuja organização e conteúdo se sintetizam neste subcapítulo.

Neste primeiro capítulo é feito o enquadramento do trabalho, sendo referidos os aspetos mais gerais relativos ao tema tratado. São ainda definidos os objetivos, a metodologia empregue para os atingir e finalmente uma breve descrição da organização do trabalho.

No Capítulo 2 apresenta-se uma análise relativa às características das MBT. São divulgadas as tecnologias atualmente disponíveis para conseguir a redução da temperatura de fabrico/aplicação, e são referidos ainda alguns aspetos ligados à produção e aplicação das mesmas. Apresenta-se ainda um balanço entre os benefícios e as desvantagens deste tipo de misturas betuminosas. Para finalizar apresentam-se os aspetos considerados mais relevantes no que respeita à formulação de MBT com incorporação de MBR.

No Capítulo 3 é realizada uma revisão bibliográfica sobre misturas betuminosas do tipo SMA –*Stone Mastic Asphalt*, descrevendo-se sucintamente o seu princípio de funcionamento, a sua composição típica, os aspetos relacionados com o seu fabrico/aplicação e as utilizações em que este tipo de camada de desgaste pode ser encontrado. Por último, são referidas algumas vantagens e desvantagens da sua utilização, que vêm sendo observadas no decorrer de estudos e experiências práticas realizadas, bem como algumas obras já realizadas em Portugal, com recurso a este tipo de misturas.

No Capítulo 4 apresentam-se os trabalhos experimentais realizados e os resultados obtidos, referentes ao estudo da caracterização de uma MBT, do tipo SMA, com MBR e fibras celulósicas. Ao longo deste capítulo, são apresentadas as propriedades de cada um dos materiais constituintes da mistura, bem como os procedimentos realizados no seu fabrico e na compactação de provetes cilíndricos e lajetas. São também apresentadas as características de cada ensaio, assim como os procedimentos adotados e o seu enquadramento normativo. Os resultados dos ensaios, de caracterização volumétrica e mecânica, são posteriormente comparados com os apresentados em trabalhos similares e especificações existentes, observando-se a coerência dos resultados obtidos.

No Capítulo 5 faz-se uma síntese do trabalho desenvolvido, resumindo as principais conclusões obtidas, e referem-se sugestões para a realização de possíveis trabalhos futuros que possam aprofundar o estudo desenvolvido no âmbito da presente dissertação.

Além dos cinco capítulos que constituem o corpo da dissertação, esta inclui ainda três apêndices, os quais contêm os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais:

- O apêndice I reúne os resultados obtidos na caracterização dos agregados constituintes da mistura analisada, nomeadamente do agregado da MBR, e as proporções de cada uma das frações granulométricas na mesma.

- No apêndice II apresentam-se os resultados da avaliação da mistura betuminosa, particularmente os referentes ao método de Marshall, avaliação da sensibilidade à água, determinação de módulos de rigidez e resistência à deformação permanente.
- No apêndice III apresentam-se, detalhadamente, os resultados gráficos obtidos dos ensaios realizados, nomeadamente no ensaio de compressão de Marshall e no ensaio de sensibilidade à água.

2 MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS

2.1 Enquadramento

As misturas betuminosas fabricadas a quente (MBQ), produzidas a temperaturas superiores a 140°C, para aplicação em pavimentos rodoviários, são responsáveis por uma percentagem significativa do consumo de energia e da emissão de gases poluentes.

Confrontado com esta realidade, o setor rodoviário é pressionado no sentido de desenvolver esforços que permitam reduzir os impactes ambientais originados pelas tecnologias de produção de misturas betuminosas, caminhando ao encontro do estipulado no Protocolo de Quioto. Sendo este, um acordo internacional, no qual os países signatários (países que assinaram o tratado) têm o compromisso de reduzir a emissão de gases com efeito de estufa (GEE), responsáveis pelo aquecimento global.

Em resposta a este acordo, foram desenvolvidas diversas técnicas que permitiram a redução da temperatura de produção e aplicação em obra de misturas betuminosas, dando origem ao aparecimento das denominadas misturas betuminosas temperadas (MBT), possibilitando a redução de alguns dos inconvenientes causados pelo uso de temperaturas elevadas na produção das misturas a quente.

A produção de misturas betuminosas temperadas dá-se a uma temperatura inferior ao que se verifica na produção de misturas betuminosas a quente, isto é, a uma temperatura inferior a 140°C.

Vários foram os acontecimentos que conduziram ao aparecimento das misturas betuminosas temperadas. Abaixo resumem-se sequencialmente alguns desses acontecimentos, (Martinho, 2013; Prowell et al, 2011; Ferreira, 2009).

- 1956 – O Professor *Ladis Csanyi*, da **Universidade do Iowa – EUA**, produziu pela primeira vez betume espumado, injetando vapor de água no betume quente, para reduzir a temperatura de mistura.
- 1968 – A **Mobil Oil** na **Austrália** modificou o método original, substituindo a injeção de vapor de água por água fria para espumar o betume.
- 1970 – A **Chevron** (uma das grandes empresas mundiais do ramo energético, especialmente petrolífero) desenvolveu novos métodos de dimensionamento e formulação de misturas betuminosas a partir de emulsões betuminosas.

- 1977 – É publicado nos **EUA** o “*Bitumuls Mix Manual*”, um manual de referência sobre misturas fabricadas a frio.
- 1994 – *Maccarone*, investigador **Australiano**, avaliou o desempenho de misturas betuminosas a frio usando betume espumado e emulsões com elevada taxa de ligante, conseguindo reduzir o consumo de energia e de emissões.
- 1995 – Primeiras Misturas Temperadas produzidas na **Europa (Alemanha)**, com adição de zeólitos.
- 1996 – A petrolífera **Shell** e o construtor **Kolo Veidekke** iniciam os testes com o betume espuma na **Noruega**.
- 1997 – O *Sasobit* (aditivo orgânico) começa a ser amplamente comercializado na **Europa**.

É construído o primeiro pavimento com *Sasobit* na **Europa (Alemanha)**.

- 1999 – São construídos os primeiros trechos, em estrada, com betume espuma na **Noruega** e com zeólitos na **Alemanha**.
- 2000 – Iniciam-se investigações em **França** na área das MBT.
- 2002 – A NAPA introduz as misturas temperadas nos **Estados Unidos da América**.
São executados os primeiros trechos experimentais em **França**.
- 2003 – Misturas temperadas ganham grande destaque na Conferência Anual Internacional da NAPA.
- 2004 – Demonstração Mundial de Misturas Temperadas com uso de zeólitos. Construção das primeiras estradas nos **EUA** com recurso a MBT (em **Florida e Carolina do Norte**).
- 2005 – A NAPA e a FHWA (*Federal Highway Administration*) formam um grupo técnico de trabalho nos **EUA** para o estudo das misturas temperadas (WMA TWG).
- 2006 – A FHWA, em conjunto com a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e a *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) iniciaram uma tournée de divulgação internacional da tecnologia das misturas temperadas.
- 2007 – É divulgado, pela NCHRP, o primeiro método de formulação de misturas temperadas.

É realizado o “*Warm Mix Asphalt Scan Tour*”, que percorre a **Noruega**, a **Alemanha**, a **Bélgica** e a **França**.

- 2008 – Construção do primeiro trecho com MBT na **África do Sul**.

São comercializadas 13 tecnologias de produção de MBT nos **EUA**.

São publicadas nos **EUA** (pelo WMA TWG) as primeiras especificações técnicas que regulam a aplicação de misturas temperadas na construção de autoestradas.

- 2010 – 30 estados Americanos já especificações técnicas nos seus Cadernos de Encargos para MBT.

Já estão executadas obras com MBT em 45 estados dos **EUA** e em 10 províncias do **Canadá**.

Mais de 20 tecnologias de produção de MBT são comercializadas nos EUA.

Até ao final de 2010, terão sido aplicadas cerca de 50 milhões de toneladas de MBT só nos **EUA**.

- 2011 – Aplicação de cerca de 3,5 milhões de toneladas de MBT na **China**.

2.2 Características das Misturas Betuminosas Temperadas (MBT)

As misturas betuminosas temperadas são produzidas a temperaturas inferiores a 140°C, na sua composição podem ser utilizados agregados naturais, e/ou reciclados, e podem ser espalhadas e compactadas usando as tecnologias tradicionais.

Os procedimentos seguidos no fabrico das MBT não apresentam muitas diferenças comparativamente ao que acontece no fabrico das MBQ (Martinho, 2013).

A redução da temperatura pode ser conseguida através da simples junção de um aditivo químico ou orgânico, ou através da utilização de um processo de fabrico que possibilite a formação de espuma de betume. É possível uma redução de até 40% da temperatura de produção, aplicação e compactação face às MBQ (Pereira, 2010).

São várias as formas de classificação de misturas betuminosas, sendo uma delas qualificada tendo em conta, o grau de redução da temperatura de produção em central.

É possível distinguir, de um modo geral, quatro tipos de misturas betuminosas, tal como se pode observar na Figura 2.1.

- Misturas Betuminosas a Frio;
- Misturas Betuminosas Semitemperadas;
- Misturas Betuminosas Temperadas;
- Misturas Betuminosas a Quente.

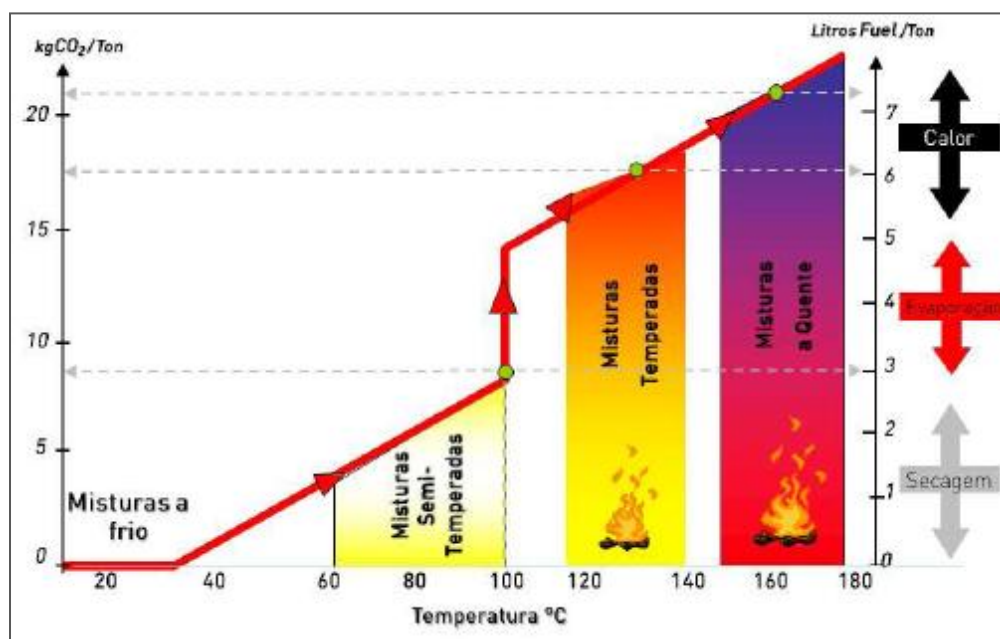


Figura 2.1 – Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas em função da temperatura de fabrico (Barbosa, 2012).

2.3 Mecanismos Envolvidos na Redução da Temperatura

São várias as tecnologias que possibilitam a produção de misturas betuminosas temperadas, algumas das quais provocam modificações temporárias, ou permanentes, de algumas propriedades do betume, como por exemplo a viscosidade. A possível redução da viscosidade do betume permite que o agregado seja totalmente revestido a uma temperatura mais baixa do que a tradicionalmente exigida na produção MBQ (FHWA, 2010).

Nas tecnologias que utilizam aditivos surfactantes para produzir MBT, a adesividade entre o ligante e as partículas de agregado é melhorada, de modo a facilitar o revestimento dos agregados pelo betume.

É possível classificar as tecnologias mais comuns em três grupos diferentes (EAPA, 2010; Prowell et al, 2011; Martinho et al, 2013 b) consoante o princípio que utilizam para baixar a temperatura de fabrico e aplicação de MBT:

- Utilização de Aditivos Orgânicos;
- Utilização de Aditivos Químicos;
- Tecnologias de Espuma de Betume.

As técnicas que utilizam aditivos são de um modo geral as mais simples de aplicar, porque permitem utilizar as centrais de fabrico sem necessidade de alterações, o que constitui uma vantagem significativa (Martinho et al, 2013 b). A maioria dos aditivos são geralmente sólidos, e introduzidos na mistura à temperatura ambiente, uma vez que são fornecidos sob a forma de pastilhas ou *pellets*. Alguns estão disponíveis no estado líquido, tendo um período de validade para a sua aplicação mais curto (Prowell et al, 2011; Martinho, 2013).

2.3.1 Aditivos Orgânicos

Os aditivos orgânicos são constituídos por ceras orgânicas que ao serem adicionadas às misturas betuminosas reduzem a viscosidade do betume. Tal facto é possível, porque o betume está a uma temperatura superior à do ponto de fusão dos aditivos (acima de cerca de 90°C). A redução da viscosidade mantém-se constante durante todo o processo de mistura e compactação, ou seja enquanto o betume se mantém a uma temperatura suficientemente quente (EAPA, 2010; Barbosa, 2012).

Quando o betume arrefece, os aditivos cristalizam, aumentando a rigidez do ligante e a sua resistência à deformação (Martinho, 2013).

O tipo de aditivo orgânico deve ser selecionado tendo em conta as temperaturas esperadas em serviço, garantindo que o ponto de fusão do aditivo seja sempre superior à temperatura de serviço. Desta forma, é possível reduzir o risco de ocorrência de deformações permanentes e a possibilidade de ocorrerem fendas associadas a baixas temperaturas (EAPA, 2010; Ferreira, 2009).

A utilização de aditivos orgânicos possibilita uma redução de cerca de 20 a 30°C na temperatura de mistura (EAPA, 2010).

Existem vários aditivos que se encontram nesta categoria, destacando-se o *Sasobit*[®], um dos produtos comerciais mais comuns no mercado. É produzido a partir do gás natural pelo processo *Fisher-Tropsch (FT)* (Capitão et al, 2012; Prowell et al, 2011; Barbosa, 2012). Além do *Sasobit*[®], existem outros aditivos orgânicos tais como o *Asphaltan B*[®] – mistura de ceras obtidas por extração com solvente a partir da lenhite, ou carvão castanho (Cera de Montana) e amidas de ácidos gordos, e a tecnologia *Shell Thiopave*TM – que utiliza um aditivo de enxofre melhorado, patenteado pela Shell, entre outros (Capitão et al, 2012; Martinho, 2013).

Nas Figuras 2.2 a 2.4 ilustra-se o aspeto visual de alguns dos aditivos referidos quando comercializados na forma de *pellets*.

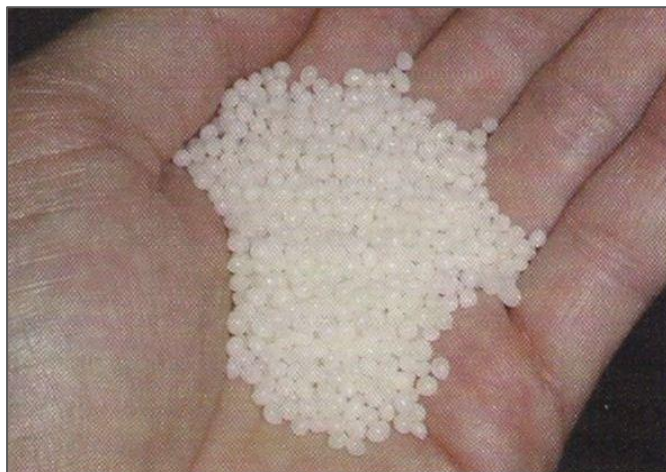


Figura 2.2 – Aditivo orgânico – Sasobit[®] (Prowell et al, 2011)



Figura 2.3 – Aditivo orgânico – Shell Thiopave[™] (Prowell et al, 2011)



Figura 2.4 – Aditivo orgânico – Asphaltan B[®] (MMAC, 2010)

Existem diversos aditivos que resultam de combinações de vários produtos com diferentes propriedades e objetivos. A sua utilização destina-se a proporcionar melhorias em diferentes propriedades das misturas betuminosas e ao mesmo tempo possibilitar o escoamento de subprodutos provenientes de várias atividades industriais (Martinho, 2013).

A classificação da tecnologia com recurso a estes aditivos não se enquadra inteiramente em nenhum dos três grupos acima mencionados. Deste modo, pode-se designar esta tecnologia como a que recorre à utilização de aditivos Mistos/ Outros aditivos.

Nos trabalhos laboratoriais realizados nesta dissertação foi utilizado um aditivo composto por *Sasobit*[®] (aditivo orgânico em cima referido e apresentado) e fibras naturais de celulose com betume. Este aditivo combinado é comercializado com a designação de *Viatop CT 40*[®] e apresenta-se sob a forma de um granulado sólido (Figura 2.5).

O *Viatop CT 40*[®] tem na sua constituição 60% de fibras de celulose com betume e 40 % de *Sasobit*[®].



Figura 2.5 – Viatop CT 40[®] [adaptado de (MMAC, 2010; Alibaba, 2014)]

A adição de fibras celulósicas tem vindo a ser cada vez mais utilizada no fabrico de misturas betuminosas com maiores percentagens de betume, tendo como objetivo a estabilização das misturas betuminosas. Impedindo o escorrimento e/ou exsudação do betume, nomeadamente, em misturas mais descontínuas, como por exemplo do tipo (SMA) *Stone Mastic Asphalt*, em estudo nesta dissertação.

Assim, a utilização do *Viatop CT 40*[®] permite garantir a estabilidade da mistura e simultaneamente a possibilidade de desenvolver o seu fabrico a temperaturas mais baixas (misturas temperadas), diminuindo o consumo de combustível e a emissão de gases poluentes (Martinho et al, 2013 a).

2.3.2 Aditivos Químicos

Atualmente, são vários os aditivos químicos relatados na literatura especializada sobre MBT. Estes aditivos são formados por um conjunto de produtos, tais como agentes tensioativos (surfactantes), agentes de emulsificação, promotores de revestimento dos agregados e aditivos anti descolamento (Capitão et al, 2012).

O processo de produção de MBT com recurso a aditivos químicos não assenta na redução da viscosidade do betume, mas sim em modificações microscópicas ao nível da superfície de contacto entre os agregados e o betume. Deste modo, a adesividade e o envolvimento dos agregados pelo betume é melhorada, mesmo a baixas temperaturas, sem alterar consideravelmente o desempenho da mistura (Barbosa, 2012; Capitão et al, 2012; Ferreira, 2009). Para além disso, este tipo de aditivo pode atuar como “lubrificante” melhorando a trabalhabilidade da mistura.

Os aditivos químicos são normalmente adicionados ao betume durante a fase de mistura, sob a forma granular, líquida ou através de técnicas que possibilitam a sua adição através de emulsões betuminosas.

Os aditivos químicos podem reduzir as temperaturas de mistura e compactação em cerca de 30°C (Martinho, 2013).

De entre os diversos aditivos químicos, destacam-se (Pereira, 2010; Alves, 2012):

- *Rediset*TM WMX – é um produto comercializado na forma granular, a sua adição ao betume permite uma redução da temperatura de produção e compactação da mistura. É constituído por uma combinação de agentes tensioativos químicos e orgânicos, que modificam a reologia do ligante (Figura 2.6).



Figura 2.6 – Aditivo químico – *Rediset*TM WMX (MMAC, 2010)

- *Cecabase[®] TA* – é um produto na forma de gel, constituído por uma base de agentes tensioativos que, quando misturados com o betume, permitem reduzir a temperatura de mistura e de compactação (Figura 2.7). É de simples utilização e estável ao armazenamento até cerca de dez dias, e não obriga a quaisquer modificações na central de produção da mistura (Pereira, 2010).



Figura 2.7 – Aditivo químico – *Cecabase[®] TA* (Pereira, 2010)

- *EvothermTM* – é uma tecnologia americana em que um conjunto de aditivos é utilizado na forma de emulsão betuminosa. A emulsão é inserida diretamente na central em substituição do betume base, é misturada com os agregados quentes permitindo realizar a mistura a uma temperatura inferior. Durante a produção, a água contida na emulsão vaporiza-se, proporcionando um bom revestimento dos agregados. O *EvothermTM* contém uma percentagem de betume residual da ordem dos 70%, o que aumenta a afinidade do betume ao agregado. Este aditivo é de fácil utilização, visto não ser necessário alterações nas centrais de misturas betuminosas (Ferreira, 2009; Pereira, 2010).
- *RevixTM* ou *EvothermTM 3G* – é uma tecnologia que combina agentes tensioativos, ceras, polímeros, ácidos e outros materiais, que melhoram a capacidade do betume para revestir os agregados durante a fase de mistura e compactação. Esta tecnologia não requer quaisquer modificações nas centrais de produção de mistura betuminosa, devendo o aditivo ser incorporado diretamente no betume quente antes da sua mistura com os agregados.

2.3.3 Espuma de Betume

São várias as tecnologias utilizadas para a obtenção de espuma no betume. Em algumas é introduzida uma pequena quantidade de água pulverizada (Figura 2.8) noutras são utilizados zeólitos naturais ou sintéticos.

Assim sendo, alguns autores subdividem as tecnologias para espumar o betume em dois grupos: tecnologia à base de água e tecnologias que contém água (Martinho, 2013).

- Tecnologia à base de água

Neste caso, o betume-espuma é obtido através da combinação do betume pré-aquecido com água fria pulverizada (Martinho, 2013). Quando a água entra em contacto com o betume, vaporiza-se rapidamente, levando o betume a formar uma “espuma”, provocando um aumento temporário do seu volume, cerca de 20 a 30 vezes superior ao verificado inicialmente, e uma diminuição significativa da sua viscosidade (EAPA, 2010; Pereira, 2010).

A espuma de betume é produzida, podendo ser de seguida misturada com os agregados à temperatura ambiente ou previamente aquecidos a uma temperatura inferior a 100°C, de modo a melhorar algumas propriedades da mistura betuminosa (Martinho, 2013).

Esta técnica permite obter uma redução entre 20 a 30°C da temperatura durante a fase de mistura. Após o arrefecimento, o betume volta ao seu volume inicial e à viscosidade normal, sem alteração das suas propriedades reológicas (EAPA, 2010).

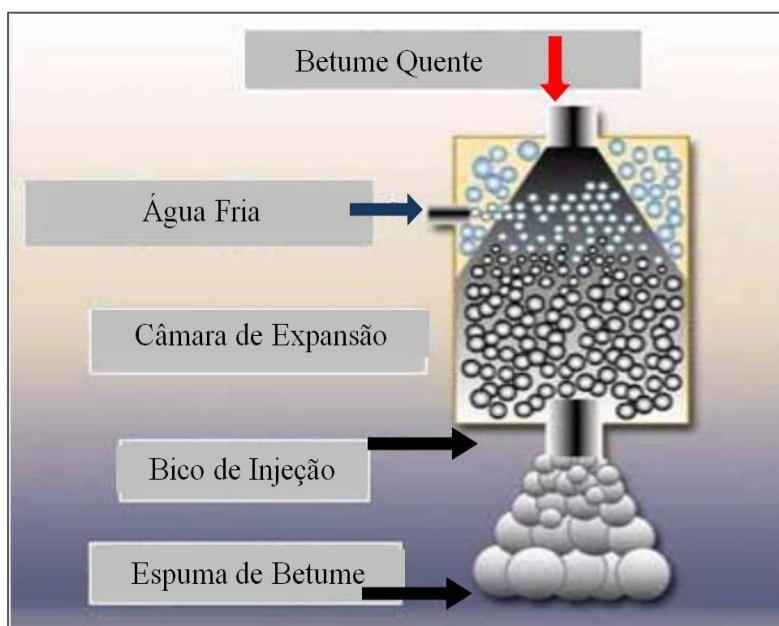


Figura 2.8 – Unidade de produção de espuma [adaptado de (EAPA, 2010)]

São vários os processos e equipamentos que permitem a produção de misturas betuminosas temperadas, através da utilização de betume-espuma, obtido por injeção de água fria, destacando-se os seguintes: *WMA-Foam*[®], *Low Emission Asphalt (LEA)*, *Double Barrel Green*[®] e *Ultrafoam GX*[®].

- Tecnologia que contém água

Estas tecnologias de produção de MBT utilizam minerais (sintéticos ou naturais) como fonte de formação de espuma no betume.

Os minerais vulgarmente utilizados são da família dos zeólitos (Figura 2.9). Estes pertencem ao grupo dos minerais aluminossilicatos hidratados e alcalimetais, possuem uma estrutura porosa e aberta podendo acomodar uma grande variedade de iões positivos, como sódio, cálcio e moléculas de água (Alves, 2012; Pereira, 2010). A característica fundamental dos zeólitos, para efeitos da sua utilização em misturas temperadas, está relacionada com a sua capacidade de absorção de água e o modo como a libertam, sem causar alterações da sua estrutura cristalina (Martinho, 2013; FHWA, 2010).

Os zeólitos podem ser naturais ou sintéticos e apresentam uma granulometria fina, podendo conter cerca de 20% de água na sua estrutura (Capitão et al, 2012), sendo inseridos no processo durante a fase de mistura do betume com o agregado (Figura 2.10). Quando sujeitos a temperaturas acima dos 100°C ocorre a expulsão das moléculas de água na forma de vapor, gerando o betume-espuma (EAPA, 2010).

A formação do betume-espuma provoca uma expansão do volume do betume, reduzindo a sua viscosidade e aumentando a trabalhabilidade da mistura a temperaturas mais baixas.

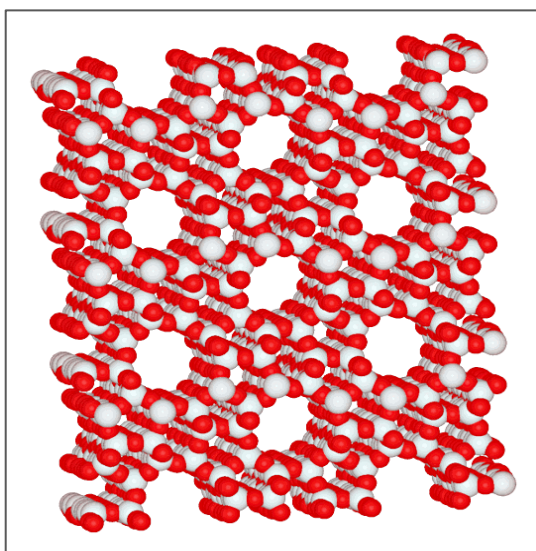


Figura 2.9 – Estrutura molecular de um zeólito (MMAC,2010)

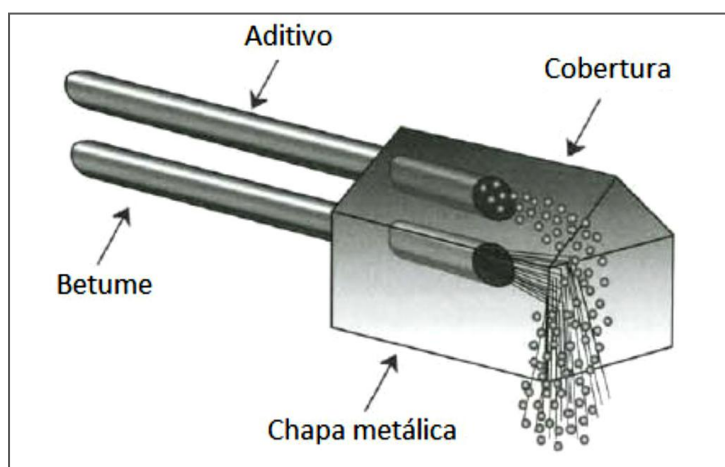


Figura 2.10 – Equipamento de adição simultânea dos zeólitos e do betume

[adaptado de (Prowell et al, 2011)]

As técnicas com recurso a zeólitos possibilitam reduções na temperatura de cerca de 30°C (EAPA, 2010).

Atualmente, a maior parte dos zeólitos são produzidos sinteticamente, destacando-se o *Aspha-min*[®] e o *Advera*[®] (Figura 2.11).



Figura 2.11 – Zeólitos sintéticos *Aspha-min*[®] (esquerda) e *Advera*[®] (direita)

2.4 Benefícios das Misturas Betuminosas Temperadas

Uma série de benefícios têm sido identificados na utilização de MBT, impulsionando o seu desenvolvimento na Europa.

As MBT, tal como já foi referido, são produzidas, aplicadas e compactadas a temperaturas inferiores às misturas produzidas a quente, estando este facto está na base da maioria dos seus benefícios.

Os benefícios da MBT podem ser agrupados em (EAPA, 2010):

- Benefícios Ambientais;
- Benefícios Económicos;
- Benefícios na Aplicação;
- Benefício para os Trabalhadores e Utilizadores da Via.

2.4.1 Benefícios Ambientais

Tendo em conta as temperaturas mais baixas aplicadas nas MBT, esperam-se inúmeras vantagens ambientais.

A diminuição da temperatura de produção e compactação reduz de forma significativa a emissão de gases poluentes libertados para a atmosfera.

A realização de uma série de avaliações, em vários países da Europa, demonstrou que há diminuição de diversas emissões durante o processo de produção de misturas temperadas, de acordo com os dados apresentados no Quadro 2.1 (FHWA, 2008).

Quadro 2.1 – Dados relativos à redução de emissões com Misturas Betuminosas Temperadas, em percentagem [adaptado de (FHWA, 2008; Powell et al, 2011)].

Emissões	Noruega	Itália	Holanda	França	Canadá
CO₂	31,5	30-40	15-30	23	45,8
SO₂	Nd	35	Nd	18	41,2
COV_s	Nd	50	Nd	19	Nd
CO	28,5	10-30	Nd	Nd	63,1
NO_x	61,5-62,5	60-70	Nd	18*	58,0
Pó	54,0	25-55	Nd	Nd	Nd

*Como NO₂

Nd – não determinado

2.4.2 Benefícios Económicos

A tecnologia usada para obter MBT associada à redução da temperatura conseguida, possibilita reduzir o consumo de energia, na produção, em 35%, ou mais. Tal facto origina uma diminuição dos custos associados, na mesma proporção (Capitão et al, 2012). A poupança energética constitui um fator de enorme relevo e importância, principalmente na atualidade, devido aos preços cada vez mais elevados de energia (Martinho et al, 2013 b).

Por outro lado, a incorporação de misturas betuminosas recuperadas possibilita uma redução do consumo de agregados novos e ligantes e uma diminuição do volume de “resíduos” a transportar para vazadouro, o que representa inúmeros benefícios em termos económicos e ambientais (Barbosa, 2012).

2.4.3 Benefícios na Aplicação

A utilização de MBT possibilita a execução de pavimentos a temperaturas mais baixas, o que acarreta inúmeras vantagens técnicas, destacando-se: a maior facilidade de mistura e compactação, mesmo em ambientes mais frios; a possibilidade de realizar pavimentações mais demoradas ou em locais mais difíceis; a capacidade de garantir boas condições de trabalhabilidade, mesmo quando a distância de transporte e a duração da viagem são superiores ao habitual (FHWA, 2008; Martinho et al, 2013 b).

Além dos benefícios já referidos, as tecnologias de produção de MBT podem ser benéficas para a utilização de betumes duros, ou sempre que se pretenda incorporar material betuminoso recuperado, na medida em que a redução da viscosidade do ligante facilita todo o processo de mistura e compactação, verificando-se também uma redução do envelhecimento do ligante. Esta redução surge devido às temperaturas mais baixas de produção, compensando o envelhecimento do ligante do material recuperado (Alves, 2012).

2.4.4 Benefício para os Trabalhadores da Via e Populações Circunvizinhas

Ao reduzir as temperaturas de produção e aplicação de misturas betuminosas reduzem-se as emissões de fumos e gases, proporcionando melhores condições de trabalho e segurança aos trabalhadores que acompanham o fabrico e a aplicação. O facto de se propiciar maior conforto e condições aos trabalhadores promove um aumento da produtividade na aplicação das MBT (Alves, 2012).

Pela mesma razão, deve-se salientar a melhoria da qualidade ambiental para as populações residentes, quer na proximidade das obras, quer nas zonas das centrais de produção.

2.5 Desvantagens das Misturas Betuminosas Temperadas

As tecnologias de produção de misturas betuminosas temperadas têm sido significativamente utilizadas em todo o mundo. No entanto, visto tratar-se de uma prática relativamente recente, existe uma série de desafios/barreiras a superar (Barbosa, 2012; Martinho, 2013).

Existem algumas preocupações relacionadas com os investimentos exigidos por parte de algumas tecnologias de MBT. Assim sendo, é necessário efetuar uma análise ponderada, de modo a garantir que as poupanças obtidas, através da redução das temperaturas, superam os custos adicionais.

Os custos associados às MBT resultam, por um lado, da necessidade inicial de adaptação da central de produção de misturas betuminosas, exigida por algumas metodologias. Por outro lado, da necessidade de adquirir aditivos importados para baixar a temperatura de produção. A aquisição destes aditivos traz alguns custos acrescidos, que podem ser parcialmente compensados pela redução do consumo de energia necessário (Barbosa, 2012; Martinho, 2013).

A produção de MBT permite reduzir a emissão de gases poluentes, constituindo um forte benefício ambiental. Contudo, para a elaboração destas misturas é necessário utilizar aditivos e a sua produção gera emissões de carbono, contrabalançando o benefício referido.

Além disso, a utilização de aditivos nas MBT pode originar ainda alguns problemas adicionais, causados pela reduzida quantidade de aditivo introduzido na mistura, por exemplo, 0,3 a 0,6% em peso do ligante, dificultando a trabalhabilidade do betume, ou da mistura betuminosa.

Também a baixa trabalhabilidade de algumas misturas temperadas pode conduzir a porosidades baixas, em comparação com as MBQ, o que em conjunto com um menor endurecimento do betume, devido à sua menor oxidação durante todo o processo de produção, pode aumentar o potencial para ocorrência de deformação permanente, apesar de também conduzir a uma maior durabilidade.

Segundo alguns autores, a utilização de baixas percentagens de betume, na mistura, acarreta preocupações relacionadas com a suscetibilidade à humidade das camadas onde se aplicaram as MBT (Martinho et al, 2013 b; Zaumanis, 2010).

2.6 Misturas Betuminosas Recicladas

No domínio dos pavimentos rodoviários flexíveis, a reciclagem é uma das tecnologias que melhor se enquadra na necessidade de seleccionar métodos mais sustentáveis na construção, podendo apresentar importantes vantagens de ordem económica desde que seja possível desenvolver misturas com um desempenho adequado a longo prazo (Fonseca et al, 2008).

A técnica de reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis consiste em fabricar novas misturas betuminosas, utilizando materiais fresados proveniente de pavimentos antigos a reabilitar e adicionando novos materiais corretivos, agregados e betume. No contexto nacional é comum designar a mistura final por *Mistura Betuminosa Reciclada* (Branco et al, 2011; Batista, 2006).

O material betuminoso a reciclar é designado de forma diferente, de país para país, e até dentro do mesmo país, como é o caso de Portugal. Nos Estados Unidos da América (EUA) usa-se correntemente a designação de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), em Espanha *Mezcla Betuminosa a Reciclar* ou *Material Betuminoso a Reciclar*, e em Portugal são correntes as designações de *Material fresado* (MF), *Fresado*, *Fresados*, *Material Fresado de Misturas Betuminosas*, *Mistura Betuminosa Fresada*, *Resíduos de Misturas Betuminosas* e, por último, *Mistura Betuminosas Recuperadas* (MBR) considerada na especificação E 472-2009, publicada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Batista, 2006; LNEC, 2009), e adotada ao longo deste trabalho.

A incorporação de MBR em novas misturas apresenta inúmeras vantagens, destacando-se as seguintes (Branco et al, 2011):

- redução do impacto ambiental – visto contribuir para a diminuição da necessidade de colocar as misturas extraídas em vazadouro, reduzindo o problema da produção de resíduos;
- redução da utilização de novos agregados e ligantes betuminosos – uma vez que a MBR já tem na sua constituição parte do material necessário para a nova mistura, diminuindo a necessidade de extração desses materiais, contribuindo também para a diminuição do impacto ambiental;
- redução de custos – conseguida, desde logo pela economia dos agregados e do betume, sendo que a economia do betume é um fator mais preponderante na redução de custos, devido ao aumento que se tem observado nos últimos anos no preço do petróleo bruto.

A reciclagem de misturas betuminosas pode ser conseguida recorrendo a diferentes técnicas: a frio ou a quente, *in situ* ou em central, e com diferentes ligantes (betume asfáltico, emulsão betuminosa ou cimento). As principais técnicas de reciclagem de misturas betuminosas resumem-se no Quadro 2.2 (Batista, 2006):

Quadro 2.2 – Principais técnicas de Reciclagem (adaptado de Batista, 2006)

Tipo de Reciclagem	Localização do processo de Reciclagem	
	<i>In situ</i>	<i>Em Central</i>
Reciclagem a Frio com Cimento	✓	✗
Reciclagem a Frio com Emulsão Betuminosa	✓	✓
Reciclagem a Frio com Betume - Espuma	✓	✓
Reciclagem Semi-Quente com Emulsão Betuminosa	✗	✓
Reciclagem a Quente	✓	✓

✓ Sim ✗ Não

Na reciclagem *in situ*, após a fresagem dos materiais (misturas betuminosas e/ou materiais das camadas granulares) é adicionado o respetivo ligante, seguindo-se a aplicação sequencial da mistura reciclada. Nestas técnicas, regra geral, todo o material fresado é incorporado na nova mistura.

No caso das técnicas de reciclagem em central, o material proveniente da fresagem é transportado para a central sendo posteriormente incorporado na produção das misturas recicladas, as quais são aplicadas no local de proveniência da MBR ou noutras obras (Batista, 2006).

Comparando as misturas recicladas produzidas *in situ* com as em central, as primeiras apresentam normalmente características de desempenho inferiores às misturas produzidas em central. No entanto, a necessidade de transportar a MBR para o local da central de produção, no caso da reciclagem em central, aumenta os custos associados à produção da nova mistura betuminosa, principalmente se esta for realizada num local bastante afastado do local de colocação, representando uma desvantagem para este tipo de reciclagem, eventualmente compensada pela maior qualidade e fiabilidade do produto final obtido (Fonseca et al, 2008; Branco et al, 2011).

Em relação ao tipo de centrais utilizadas para a produção de misturas betuminosas recicladas, estas apresentam limitações diferentes no que respeita às taxas de reciclagem possíveis de incorporar. Quando a central não permite proceder ao pré-aquecimento da MBR, as taxas de reciclagem não ultrapassam geralmente os 35%, embora em determinadas condições (central de fabrico perto do local de colocação) se possa chegar a 40%. Quando é possível fazer esse processo as taxas de reciclagem podem rondar os 65 a 70% (Branco et al, 2011; Fonseca et al, 2008).

A reciclagem de pequenas taxas, normalmente inferiores a 20%, consegue ser realizada praticamente em todas as centrais atualmente existentes, bastando apenas pequenas adaptações. As misturas assim obtidas são homogéneas e as características são praticamente iguais às conseguidas com agregados novos. A MBR é adicionada aos agregados quentes,

antes da entrada para a misturadora, ou então diretamente na mesma, sendo aquecida por condução através dos agregados novos (Branco et al, 2011; Fonseca et al, 2008).

Segundo Antunes et al, (Antunes et al, 2009) a formulação de misturas betuminosas recicladas a quente em central (com MBR) deve passar pelas fases descritas na Figura 2.12.

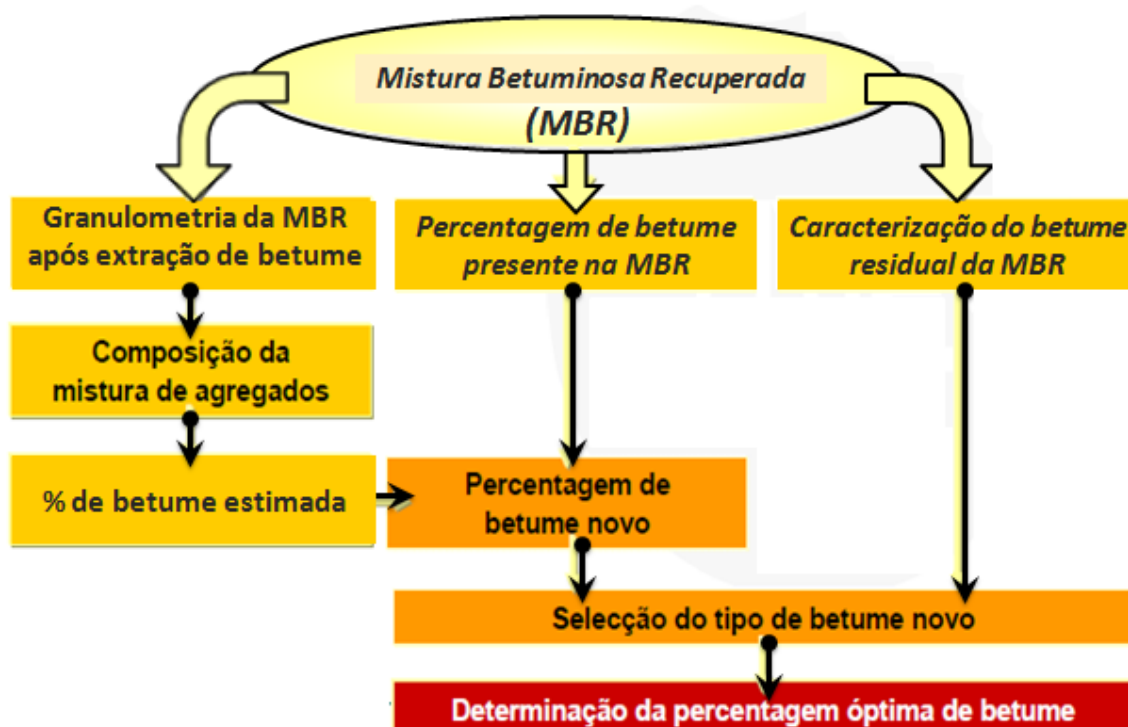


Figura 2.12 – Determinação da percentagem ótima de betume nas MBQ com MBR (Antunes et al, 2009; Martinho, 2013).

Um dos parâmetros que maior influência pode ter na formulação de uma mistura reciclada é a percentagem de betume residual existente na MBR. Uma correta determinação da quantidade de betume existente permite aferir de forma mais rigorosa a quantidade de betume novo a adicionar, o qual é a componente mais cara de uma mistura (Fonseca et al, 2008)

2.7 Misturas Betuminosas Temperadas (MBT) com Incorporação de Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR)

As MBR incorporadas em novas misturas são compostas por dois tipos de materiais: os agregados, que mantêm as suas características originais, variando apenas ligeiramente as suas dimensões; e o betume, que se encontra envelhecido por oxidação, devido a sucessivos aquecimentos e arrefecimentos causados pelas condições atmosféricas e à ação da radiação solar a que esteve submetido durante alguns anos (Fonseca et al, 2008). Deste modo, a incorporação de MBR é uma prática facilitada quando se recorre a tecnologias de produção de

Misturas Betuminosas Temperadas (MBT), pelo facto destas garantirem um adequado envolvimento dos agregados a menores temperaturas, abrandando o aumento do envelhecimento do betume e consequentemente a sua rigidez (Fonseca et al, 2008).

Por outro lado, a incorporação de elevadas taxas de MBR, na produção de misturas betuminosas recicladas a quente, tem implicações significativas no rendimento da central e no consumo energético associado ao sobreaquecimento dos agregados virgens. O rendimento agrava-se sempre que a MBR apresenta um teor em água mais elevado, nomeadamente nas épocas do ano com maior precipitação. Desta forma, a produção de misturas betuminosas recicladas a quente torna-se inviável do ponto de vista económico, sendo necessária uma solução alternativa que possibilite a produção daquele tipo de misturas, a qual poderá passar pela utilização, uma vez mais, de tecnologias de produção de misturas betuminosas temperadas, ou pela adaptação da central de produção de misturas betuminosas convencionais, possibilitando o pré-aquecimento a 90°C da MBR, ou ainda as duas em simultâneo (Fonseca et al, 2008; Branco et al, 2011).

De acordo com o verificado por Martinho et al, (Martinho et al, 2013 b), no fabrico, transporte, espalhamento e na compactação de MBT com incorporação de MBR, podem ser seguidas as mesmas regras usadas no caso de MBQ. Do ponto de vista da caracterização mecânica, este tipo de misturas, apresentam resultados semelhantes aos determinados para as MBQ.

Alguns estudos recentes mostraram ainda, que é possível produzir MBT incorporando apenas uma quantidade reduzida de agregados virgens, complementada com agregados reciclados, permitindo produzir MBT com custos energéticos de produção inferiores e com características equivalentes às misturas tradicionais fabricadas a quente, podendo constituir uma alternativa muito eficiente às MBQ na construção e reabilitação de pavimentos (Martinho et al, 2013 b).

As vantagens conseguidas com as MBT que incorporam MBR são muito diversas. Podem apontar-se a redução do consumo e do custo das matérias-primas naturais, a diminuição do volume de resíduos transportados para depósito, o abaixamento da energia utilizada na produção e no aquecimento dos agregados, e a redução da poluição e do passivo ambiental (Martinho et al, 2013 b).

2.8 Considerações Finais

Analisando a literatura especializada, verifica-se que o progresso das diversas tecnologias de produção de MBT tem sido muito estimulado desde a década de 1990.

Atualmente são inúmeras as tecnologias disponíveis para produzir MBT, podendo ser classificadas em três grupos: utilização de aditivos orgânicos, aplicação de aditivos químicos e o uso de tecnologias de formação de espuma.

Os principais objetivos pretendidos por parte da maioria das tecnologias envolvidas na produção de MBT é a redução da temperatura de fabrico e aplicação das misturas, conseguindo um desempenho equivalente, ou até melhor, face ao verificado para as MBQ.

As vantagens conseguidas vão desde a redução do consumo de energia, na produção, em cerca de 35% ou mais, dependendo do processo usado para obter MBT, o que origina uma redução do custo associado na respetiva proporção, até à redução da emissão de gases poluentes, representando um forte benefício ambiental.

As Misturas Betuminosas Temperadas podem ser produzidas com agregados naturais, ou reciclados e podem ser espalhadas e compactadas usando as tecnologias tradicionais. Alguns estudos em desenvolvimento provam que algumas MBT que incluem MBR, juntamente com os aditivos adequados, apresentam um desempenho mecânico do mesmo nível do exibido pelas MBQ.

A incorporação de MBR em novas misturas é beneficiada recorrendo a tecnologias de produção de MBT, devido ao facto de permitirem um adequado envolvimento dos agregados a menores temperaturas, abrandando o envelhecimento do betume e consequentemente a sua rigidez.

3 MISTURAS BETUMINOSAS do tipo SMA – *Stone Mastic Asphalt*

3.1 Enquadramento

Os pavimentos rodoviários em serviço são submetidos, ao longo do tempo, a ações diversas, tais como o tráfego e as condições climáticas, as quais continuamente provocam a sua degradação, isto é, a redução progressiva da sua qualidade inicial (Branco et al, 2011). As camadas de desgaste dos pavimentos são particularmente afetadas pelas cargas verticais dos veículos pesados, e pelas ações tangenciais originadas pela interação pneu-pavimento. Além destas, existem outras ações que afetam a camada de desgaste, e os pavimentos de um modo geral, tais como as derivadas dos elementos e gases que compõem a atmosfera (a água, o oxigénio, a radiação ultravioleta, etc.), especialmente no caso de pavimentos flexíveis ou semirrígidos, ou seja pavimentos com camada de desgaste em material betuminoso (Martinho et al, 2013 a).

Pretende-se que os pavimentos rodoviários apresentem boas características funcionais e estruturais durante o período em que estão em serviço.

Ao nível do desempenho funcional, é desejável que os pavimentos tenham as seguintes características (Martinho et al, 2013; Branco et al, 2011; Fonseca, 2011):

- Resistência à derrapagem;
- Regularidade superficial;
- Capacidade de drenagem superficial;
- Ausência de patologias superficiais;
- Determinadas condições de permeabilidade;
- Baixa emissão de ruído de rolamento;
- Visibilidade das marcas rodoviárias.

Ao nível do desempenho estrutural, pretende-se que os pavimentos tenham as seguintes características (Martinho et al, 2013; Branco et al, 2011; Fonseca, 2011):

- Resistência à deformação permanente;
- Resistência à fadiga;
- Resistência ao fendilhamento;

- Resistência ao envelhecimento.

A construção e o reforço de pavimentos rodoviários em Portugal, assim como em muitos outros países, têm sido efetuados principalmente com recurso a pavimentos flexíveis (Figura 3.1), maioritariamente constituídos por uma camada de desgaste em material betuminoso com camadas subjacentes em material granular e/ou betuminoso (Abreu, 2009).

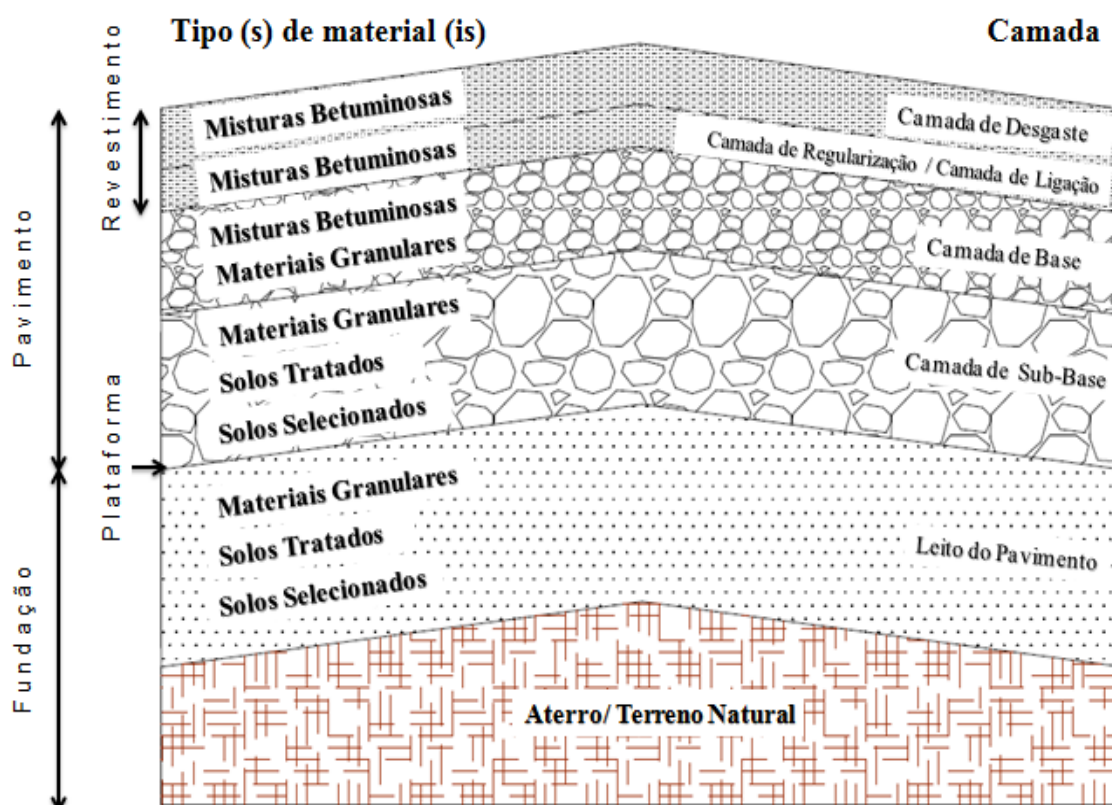


Figura 3.1 – Estrutura de um pavimento flexível [adaptado de (Fonseca, 2011)]

As misturas betuminosas aplicadas em camada de desgaste mais utilizadas na Europa são (Figura 3.2): o Betão Betuminoso (AC) – mistura betuminosa de composição granulométrica contínua ou descontínua que forma uma estrutura perfeitamente imbricada; o Betão Betuminoso em Camada Delgada (AC-TL/BBTM); o Betão Betuminoso Drenante (PA) – mistura betuminosa formulada com o objetivo de possuir uma porosidade elevada e o *Stone Mastic Asphalt* (SMA) – mistura betuminosa de composição granulométrica descontínua, composta por um esqueleto de agregado britado grosso aglutinado por um mástique (Martinho et al, 2013 a; Abreu, 2009).

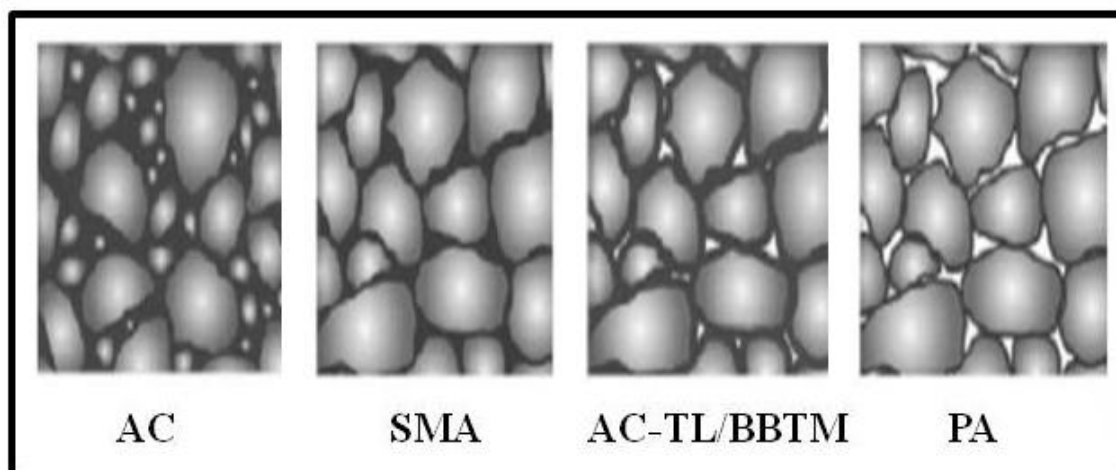


Figura 3.2 – Aspeto da estrutura interna de algumas misturas das mais utilizadas na Europa (EAPA, 2007)

As misturas betuminosas do tipo Stone Mastic Asphalt (SMA) foram desenvolvidas na Alemanha em finais da década de 60 do século XX. O seu aparecimento surgiu com o desenvolvimento do conhecimento sobre o comportamento de pavimentos (e dos seus materiais constituintes, em especial os betuminosos) com desempenho muito superior ao convencional e uma maior vida útil, possibilitando diminuindo a necessidade de intervenções de reabilitação e por consequência, levando a uma redução dos custos associados (Silva, 2005; Błażejowski, 2011).

Numa fase inicial, as misturas SMA, foram utilizadas como forma de diminuir a erosão superficial provocada pelos pneus de inverno muito utilizados nos climas com queda de neve frequente. Estes, tal como ainda hoje em algumas regiões do norte da Europa, apresentam pitons em aço na superfície de contacto com o pavimento, de forma a possibilitar o trânsito em estradas com pouca aderência devido à existência de neve e gelo. Apesar do uso destes pneus ter sido proibido na Alemanha em 1975 por questões ambientais e de agressividade para com os pavimentos, a utilização do SMA manteve-se, apresentando a sua utilização uma difusão crescente (Abreu, 2009; Gardete et al, 2011). A par desta difusão surgiram vários estudos e desenvolvimentos tecnológicos com o objetivo de melhorar as características, o desempenho e a aplicação das misturas do tipo SMA (Abreu, 2009).

3.2 Aspetos Relacionados com a Composição da Mistura

3.2.1 Generalidades

A mistura betuminosa do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA) encontra-se definida na norma Europeia (EN 13108-5) como uma “mistura betuminosa descontínua com ligante betuminoso, composta por um esqueleto de agregado britado grosso (“stone”) aglutinado por um mástique”.

A estrutura pétrea de uma mistura do tipo SMA é fortemente baseada na utilização de uma curva granulométrica descontínua. Tal facto conduz a que esta mistura apresente um comportamento em função de duas componentes distintas: os agregados grossos e o mástique betuminoso, constituído por agregados finos, fíler, aditivos e betume (Miranda et al, 2013). Pelo facto destas misturas apresentarem uma percentagem de betume relativamente elevada, é necessário recorrer, regra geral, à utilização de aditivos, tais como fibras, com o objetivo de inibir o fenómeno de escorrimento do betume (Martinho et al, 2013 a).

Na Figura 3.3 é possível observar os diferentes constituintes de um SMA apresentados de forma esquemática.

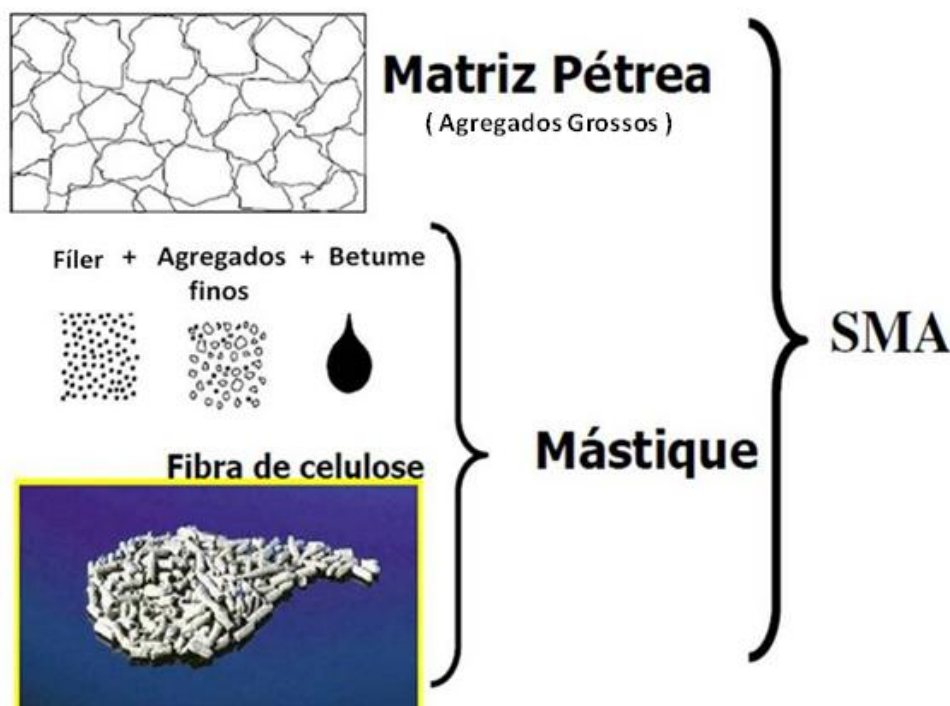


Figura 3.3 – Constituintes de uma mistura tipo do SMA [adaptado de (Júnior, 2008)]

3.2.2 Esqueleto do Agregado

Os agregados grossos, que compõem o esqueleto de uma mistura do tipo SMA, representam a maior componente da mistura e, devido às suas dimensões, tendem a assegurar por si só um elevado imbricamento, designado internacionalmente por “*stone-on-stone*”. Tal como se ilustra na Figura 3.4, isto contribui para repartir o carregamento pelas partículas de agregado, razão pela qual o SMA é tão resistente à deformação permanente (Miranda et al, 2013). Deste modo, a escolha das características do agregado torna-se fundamental no SMA, visto este ser responsável em grande medida pela sua excelente capacidade de resistência à deformação permanente, mesmo sob elevado tráfego pesado e elevadas temperaturas (Abreu, 2009).

Além disso, o esqueleto pétreo de uma mistura do tipo SMA proporciona uma boa macrotextura e aderência na camada de desgaste (Figura 3.5), contribuindo assim para um bom desempenho no que respeita à resistência à derrapagem (Martinho et al, 2013 a).

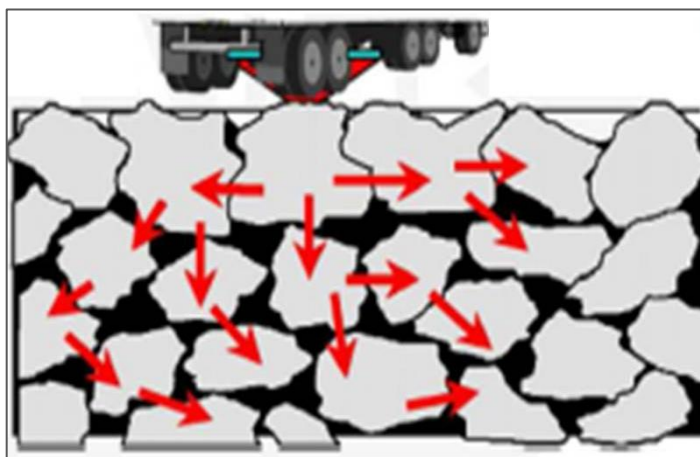


Figura 3.4 – Repartição de cargas entre as partículas de agregado grosso (Batista et al, 2012)



Figura 3.5 – Aspeto típico da superfície da mistura SMA (Júnior, 2008)

3.2.3 Mástique Betuminoso

O mástique betuminoso é o segundo maior componente presente nas misturas do tipo SMA, representando aproximadamente cerca de 20-25% do peso total da mistura e 30-35% do volume total (Błażejowski, 2011). O mástique funciona como aglutinador do esqueleto pétreo, envolvendo os agregados grossos e preenchendo parte dos espaços deixados entre os mesmos, assegurando uma coesão adequada da mistura. Aquele componente da mistura é composto, como já referido acima, por agregados finos, fíler, aditivos e betume (Figura 3.6).

Por outro lado, o facto daquele aglutinador apresentar uma percentagem relativamente elevada de betume, contribui para uma maior trabalhabilidade e durabilidade, e uma menor sensibilidade à água, o que resulta também num volume de vazios relativamente baixo neste tipo de mistura (Miranda et al, 2013). A granulometria descontínua torna a textura da superfície em contacto com o tráfego bastante aberta e rugosa, o que proporciona boas características superficiais (Abreu, 2009).

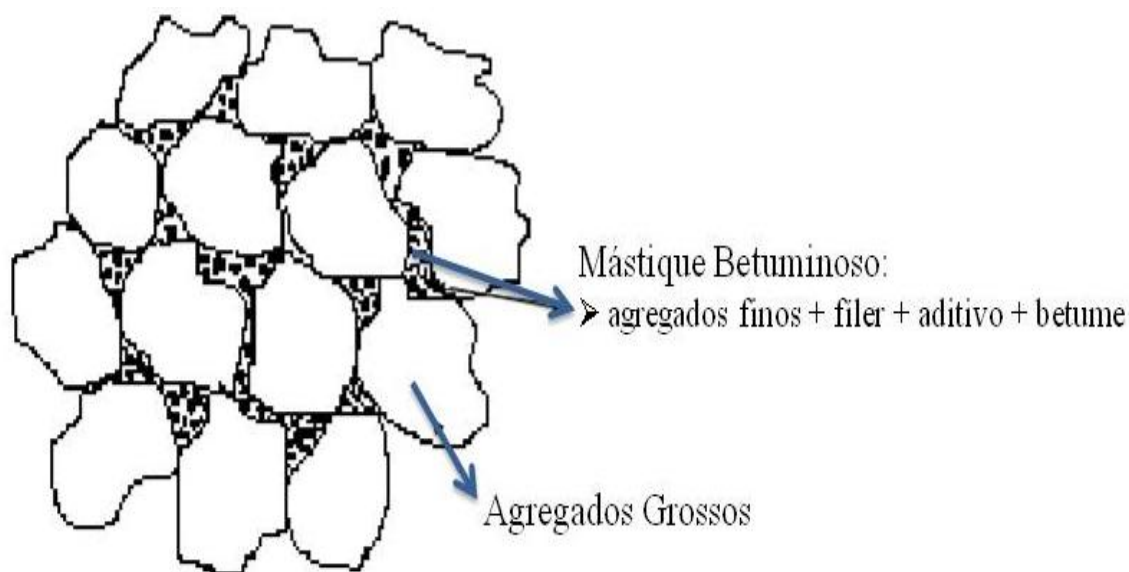


Figura 3.6 – Esqueleto interno SMA [adaptado de (Júnior, 2008)]

3.2.4 Escorrimento do Ligante

A ocorrência de escorrimento de betume e/ou mástique betuminoso é um problema frequente nas misturas betuminosas do tipo SMA (Figura 3.7). O facto destas terem uma granulometria descontínua, com elevada percentagem de agregados grossos, e de terem geralmente percentagens de ligante betuminoso relativamente altas, conduz a um aumento da suscetibilidade de escorrimento do ligante, durante o armazenamento, transporte e aplicação, o que provoca heterogeneidades nas características da camada após aplicação, levando consequentemente à sua degradação precoce (Martinho et al, 2013 a; Abreu, 2009).

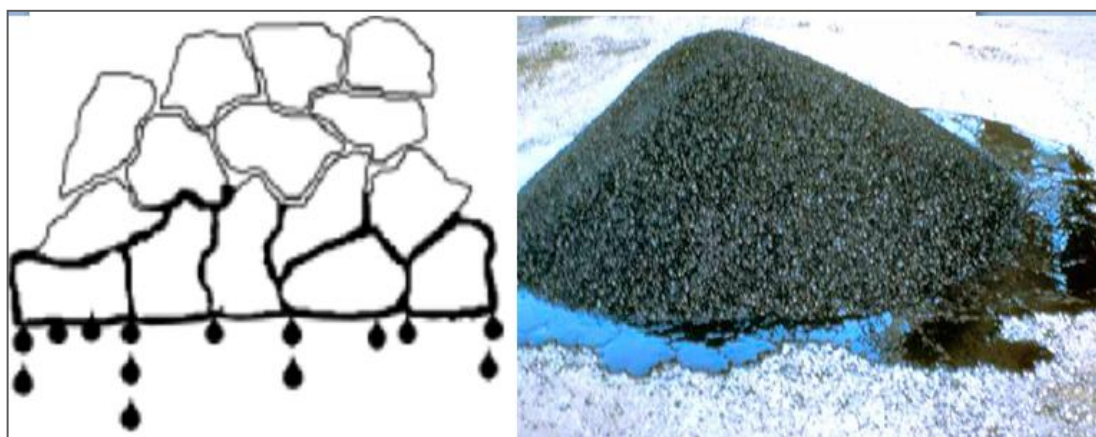


Figura 3.7 – Escorrimento do betume – SMA sem fibras [adaptado de (Júnior, 2008) e (Martinho et al, 2013 a)]

3.2.5 Fibras Celulósicas

Com o objetivo de combater o problema do escorrimento e/ou exsudação do ligante betuminoso (que pode ser avaliado segundo o ensaio preconizado na norma EN 12697-18) nas misturas betuminosas descontínuas, como as do tipo SMA, é habitual a utilização de betumes modificados e/ou com incorporação de aditivos. Entre os aditivos usualmente utilizados, é largamente divulgada a opção de fibras celulósicas que podem ser fornecidas sob várias formas (Figura 8): soltas ou em granulado (*pellets*); com ou sem revestimento de algum material, como cera ou betume (Figura 3.9). As fibras funcionam como agentes estabilizadores da mistura, possibilitando, por um lado, a absorção/retenção do betume e, por outro lado, promovendo um bom revestimento dos agregados (Martinho et al, 2013 a).



Figura 3.8 – Fibras Celulósicas: a) dispersas (soltas); b) em granulado [adaptado de (Alibaba, 2014; Junquiá, 2013)]



Figura 3.9 – Granulado de fibras de celulose: a) revestidas com betume – *Viatop Premium*[®]; b) revestidas com uma cera orgânica (*Sasobit*[®]) – *Viatop CT 40*[®] (Alibaba, 2014)

Segundo Błażejowski (2010) os agentes estabilizadores podem ser de vários tipos, como por exemplo:

- Fibras de celulose – as mais utilizadas;
- Fibras de pseudo-celulose, feitas a partir de papel inutilizado;
- Fibras minerais – desenvolvidas a partir da fusão de alguns tipos de rochas (como lã de rocha);
- Celulose-mineral – uma mistura de celulose com fibras minerais;
- Celulose-polímero – uma mistura de celulose com diferentes tipos de polímeros em proporções variadas;

- Celulose-cera – uma mistura de celulose com ceras sintéticas, que além de funcionarem como estabilizadores alteram a viscosidade do ligante betuminoso;
- Têxteis – através do processamento e fragmentação de resíduos de origem têxtil;
- Fibras plásticas – por exemplo, polipropileno;
- Fibra de vidro – em forma de fios (como lã de vidro);
- Outros tipos – por exemplo, fibras de côco.

A diferença entre as fibras está no seu poder de absorção. As fibras de celulose são as que apresentam geralmente maior eficiência de absorção de ligante betuminoso (Błażejowski, 2011), tal como pode verificar-se através dos valores indicados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Percentagem ponderal de fibras na mistura do tipo SMA [adaptado de (Batista et al, 2012)]

Tipo de Fibra	Faixa Recomendada na Mistura
Fibra de Celulose	0,3% - 0,5%
Fibra Mineral	0,7% - 0,9%
Fibra de Vidro	0,4% - 0,6%

É de salientar que a utilização de fibras orgânicas, tal como as celulósicas, tem como principal vantagem o facto de se obterem a partir de fontes renováveis.

3.3 Características de Desempenho de Misturas Betuminosas do Tipo SMA

As misturas do tipo SMA apresentam um conjunto de características que contribuem de forma positiva para o seu desempenho (Błażejowski, 2011; Miranda et al, 2013; Martinho et al, 2013 a):

- Flexibilidade a baixas temperaturas – elevada resistência à fadiga, conseguida através de uma percentagem em betume relativamente elevada;
- Estabilidade a altas temperaturas – elevada resistência à deformação permanente e à exsudação, conseguida através da descontinuidade na curva da mistura, que proporciona um maior contacto entre os agregados grossos;
- Elevada resistência ao envelhecimento (a mistura SMA tem baixo índice de vazios o que faz com que seja pouco permeável, fornecendo também satisfatória resistência ao envelhecimento);

- Adesividade betume-agregados favorável – boa resistência à acção da água e à desagregação conseguida através do mástique rico em ligante e com fibras celulósicas. Estas permitem, por um lado a retenção do betume utilizado e, por outro lado, favorecem o revestimento das partículas de agregado, melhorando a adesividade agregado/betume;
- Boa resistência superficial à derrapagem, devido ao facto da superfície da mistura em contacto com os pneus dos veículos ser relativamente aberta e com boa macrotextura;
- Redução do efeito de *spray* gerado pelo tráfego em dias de chuva, promovendo uma melhor visibilidade das marcas rodoviárias e uma menor reflexão das luzes noturnas (devido à boa macrotextura originada pelas partículas de agregado de maior dimensão na superfície do pavimento);
- Menor geração de ruído no contacto entre o pneu e o pavimento, devido às propriedades da textura superficial da camada é possível uma redução do nível sonoro gerado;
- Maior durabilidade.

Tendo em consideração as características referidas conclui-se que as misturas do tipo SMA têm geralmente um elevado desempenho mecânico e boas características funcionais, quando aplicadas em camada de desgaste. Deste modo, aquele tipo de misturas têm sido usadas em diversas aplicações por todo o mundo (Błażejowski, 2011; Fonseca, 2011):

- Vias com alta percentagem de tráfego de camiões;
- Pistas de aeroporto;
- Autoestradas;
- Autódromos;
- Portos marítimos;
- Túneis;
- Viadutos e pontes;
- Rampas;
- Paragens de autocarros;
- Intersecções;
- Rotundas excêntricas;
- Zonas de armazenamento de contentores;
- Vias com muito tráfego, ou inclinações acentuadas.

3.4 Desvantagens da Mistura Betuminosa SMA

As misturas do tipo SMA apresentam, como qualquer outro material utilizado na construção, desvantagens, sendo em geral citadas apenas três (Błażejowski, 2011; Martinho et al, 2013a):

- Não são indicadas para obras com pouco tráfego ou sobretudo constituído por veículos ligeiros;
- Apresentam baixa resistência à derrapagem inicial devido à fina película de betume que cobre os agregados, a menos que se aplique um ensaibramento (*gritting*, em inglês), o qual consiste na aplicação de uma taxa de areia, normalmente entre 1 a 2 kg/m² com uma granulometria compreendida entre 2 a 5 mm para o caso de um SMA 0/11, sobre o pavimento durante a segunda passagem do cilindro na compactação;
- Custo inicial maior, se comparado com as misturas tradicionais.

Segundo Błażejowski (2010) os custos iniciais mais altos das SMA resultam dos seguintes aspetos:

- Elevada percentagem de betume (em geral, mais de 6%) e/ou utilização de betumes modificados;
- Maiores quantidades de fíler ($\approx 10\%$);
- Elevada quantidade de agregados grossos (de melhor qualidade);
- Utilização de agentes estabilizadores (em geral, fibras);
- Temperatura de produção um pouco mais elevada, quando a mistura é produzida a quente.

Apesar do seu maior custo inicial (cerca de 15 a 25%), a durabilidade das SMA origina um menor custo no ciclo de vida (cerca de 30 a 40% menor) em relação às misturas betuminosas tradicionais. Deste modo, assume-se que o elevado custo inicial da mistura SMA é compensado pela sua durabilidade e baixo custo de manutenção.

De um modo geral, as misturas do tipo SMA têm demonstrado ser uma boa opção para aplicação em camada de desgaste, proporcionando um revestimento com bom desempenho estrutural e funcional. Alguns casos de insucesso têm sido verificados, com fibras não celulósicas, os quais se relacionam em geral com problemas de execução associados à segregação e/ou exsudação (Figura 3.10). Havendo um controlo cuidadoso dos agregados, uma dosagem apropriada de ligante e de fibras, e um controlo adequado da temperatura de aplicação e compactação aquele tipo de problemas podem ser reduzidos (Fonseca, 2011).



Figura 3.10 – Exsudação do ligante betuminoso (Fonseca, 2011)

A exsudação do ligante betuminoso está associada à migração do betume para a superfície do pavimento, ocorrendo sob a forma de manchas isoladas ou em grande extensão. Esta excessiva presença de betume na superfície é identificada pelo aparecimento de marcas causadas pelos pneus em dias quentes. Nas misturas do tipo SMA este fenómeno pode aparecer devido a (Fonseca, 2011):

- Falta ou distribuição não homogênea de fibras;
- Quantidade inadequada de fíler na mistura;
- Excesso de humidade nos agregados (particularmente no fíler);
- Perda excessiva de temperatura na mistura betuminosa antes da aplicação.

3.5 Durabilidade

Com o aumento do volume de tráfego e da carga dos veículos nas rodovias, torna-se cada vez mais importante que um pavimento atenda aos requisitos de alta durabilidade, proporcionando segurança, e conforto ao utilizador. A opção por camadas betuminosas de maior durabilidade reduz os custos de manutenção e de reabilitação das vias durante o tempo de serviço.

Segundo um estudo realizado em 2007 pela EAPA (Associação Europeia de fabricantes de Misturas Betuminosas), verificou-se que as misturas SMA têm uma durabilidade superior à de outras misturas descontínuas, ou abertas, frequentemente utilizadas em Portugal em camada de desgaste. Nesse mesmo estudo, foram avaliadas as vidas médias das misturas mais usadas em camada de desgaste na União Europeia. Apresentam-se na Figura 3.11 os valores obtidos, para o caso de estradas principais, autoestradas e estradas com tráfego pesado elevado (EAPA, 2007; Martinho et al, 2013 a).

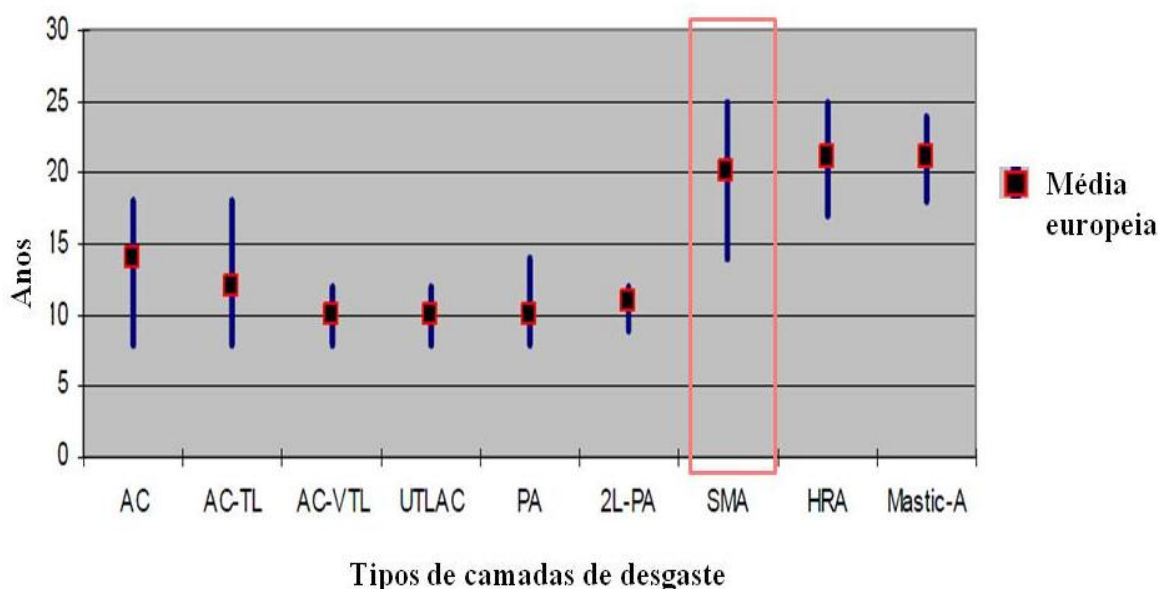


Figura 3.11 – Durabilidade média de diversas misturas utilizadas a nível europeu (EAPA, 2007)

3.6 Fabrico e Aplicação das Misturas do tipo SMA

A produção de misturas do tipo SMA faz-se de forma semelhante à das misturas convencionais. Contudo, no que diz respeito ao fracionamento do agregado é necessário um controlo mais cuidadoso, sendo também necessário garantir que o tempo de mistura é suficiente para uma perfeita homogeneidade da mistura. A introdução de fibras na mistura pode ser feita de forma manual ou através de um sistema de dosagem automático, o qual é utilizado somente para a produção de quantidades de mistura a produzir acima de 15 a 20 mil toneladas (Martinho et al, 2013 a).

A sequência mais habitual de inserção dos constituintes do SMA na misturadora, visando uma melhor homogeneização da mistura é a seguinte: primeiro os agregados minerais (inclusive o fíler), seguido pelo estabilizador (fibras celulósicas em granulado) e, por último, o ligante betuminoso (Błażejowski, 2011).

Este tipo de mistura tem a vantagem de apresentar uma elevada trabalhabilidade, devido à elevada percentagem de betume, facilitando o seu espalhamento durante a aplicação. Na fase de aplicação não é necessário recorrer à utilização de equipamentos especiais, podendo ser utilizadas as mesmas espalhadoras e os mesmos cilindros de rolos metálicos lisos que se utilizam para as misturas convencionais. Para a compactação recomenda-se que os cilindros utilizados sejam pesados, com pesos superiores a 9 toneladas-força (Martinho et al, 2013 a).

Durante a fase de compactação, alguns países utilizam o *grit* (ensaibramento), que é uma fina camada de agregado fino aplicada e compactada sobre a superfície do SMA ainda quente, de modo a aderir à superfície. Este processo tem o objetivo de aumentar o atrito inicial da camada, isto é, a sua resistência inicial à derrapagem, a qual é geralmente baixa porque uma fina camada de betume fica a cobrir a superfície das partículas de agregado. Sem a camada de *gritting* o processo de arranque da película de betume sobre os agregados dá-se com a passagem do tráfego, o que leva a uma evolução do atrito superficial de forma mais lenta. A Figura 3.12 apresenta o aspeto do *grit* incorporado na camada de SMA, e a Figura 3.13 mostra uma possibilidade de execução do *gritting* com equipamento acoplado ao cilindro compactador (Błażejowski, 2011; Ramos, 2012).

Segundo Błażejowski (2011), os agregados utilizados no *grit* devem ser sempre lavados e aplicados a uma temperatura da camada acima de 110°C. Abaixo desta temperatura não se consegue a adesão do *grit* com o betume superficial do SMA. Após a aplicação da camada de *gritting* e do arrefecimento da SMA, deve proceder-se à remoção do excesso de agregado que não aderiu.



Figura 3.12 – Aspeto do *grit* aplicado sobre a superfície do SMA (Błażejowski, 2011)



Figura 3.13 – Execução da camada de *gritting* com equipamento acoplado ao cilindro compactador (Błażejowski, 2011)

3.7 A Utilização de SMA em Portugal

A primeira aplicação prática das misturas do tipo SMA em Portugal ocorreu apenas em 2004 e só a partir de 2009 é que começaram a ser usadas de forma mais regular. No entanto, são muitos os exemplos de aplicações bem-sucedidas espalhados por todo o mundo que têm contribuído para a aquisição de experiência e conhecimento, possibilitando a criação de um importante acervo documental, o qual tem servido de suporte para a utilização das misturas do tipo SMA em várias obras já construídas em Portugal (Martinho et al, 2013 a).

Em 2010, foram desenvolvidos estudos pelo LNEC acerca de misturas do tipo SMA, em parceria com outras entidades, com o objetivo de caracterizar estas misturas ao longo do seu ciclo de vida. Estes estudos realizaram-se na mesma altura em que foi aplicada uma SMA com fibras celulósicas, em camada de desgaste, no pavimento da Avenida do Brasil e da Rotunda do Relógio, em Lisboa. No âmbito destas obras de reabilitação, foram desenvolvidos diversos estudos laboratoriais que compreenderam a formulação da mistura, a determinação de características diretamente relacionadas com o desempenho e a avaliação do escoamento do betume. Ainda no âmbito destes estudos, foi incluída a monitorização do comportamento da mistura aplicada na obra de reabilitação realizada na Avenida do Brasil, num troço em específico, através da avaliação periódica das características superficiais do pavimento: inspeção visual, avaliação da resistência à derrapagem, avaliação da irregularidade transversal, entre outras (Batista et al, 2012).

Dentre os vários projetos já realizados em Portugal, destacam-se as obras apresentadas em seguida:

- Trabalhos de Repavimentação da Rua Morais Soares, em Lisboa (2004);
Tipo de obra: Arruamento urbano - reabilitação superficial – camada de desgaste;
- Construção do Autódromo Internacional do Algarve, em Portimão (2009);
Tipo de obra: Pista de corridas – construção nova – camada de desgaste;
- Repavimentação do Nó de Francos na Via de Cintura Interna (VCI), no Porto (2009);
Tipo de obra: Autoestrada - reabilitação superficial – camada de desgaste;
- Repavimentação da Avenida do Brasil, em Lisboa (2010);
Tipo de obra: Arruamento urbano - reabilitação superficial – camada de desgaste;
- Repavimentação da Rotunda do Relógio, em Lisboa (2011);
Tipo de obra: Arruamento urbano - reabilitação superficial – camada de desgaste;
- Repavimentação da EN 12 e IC 29, no Porto (2011);
Tipo de obra: Via rápida e Estrada Nacional - reabilitação superficial – camada de desgaste;
- Repavimentação de Arruamentos e Parque da Fábrica da Texsa, em Alpiarça (2012);
Tipo de obra: Parque Industrial- reabilitação superficial – camada de desgaste;
- Beneficiação do pavimento da Autoestrada A25 (Albergaria/Viseu) (2013);
Tipo de obra: Autoestrada - reabilitação superficial – camada de desgaste;

- Beneficiação do pavimento da Autoestrada A24 (Castro d'Aire/Lamego) (2014).

Tipo de obra: Autoestrada - reabilitação superficial – camada de desgaste.

3.8 Considerações Finais

As misturas do tipo SMA têm demonstrado ser uma opção a que se recorre cada vez mais para a construção de camadas de desgaste. Essa tendência deve-se ao facto de apresentarem um conjunto de propriedades que revelam um bom desempenho mecânico e funcional, destacando-se as seguintes: boa resistência à deformação permanente, bom desempenho ao fendilhamento por fadiga e ao desgaste, boa resistência ao deslizamento, e reduzida emissão de ruído no contacto entre os pneus e o pavimento. De um modo geral, apresentam também uma vida útil superior à das misturas tradicionais, representando a longo prazo uma opção mais sustentável.

Além disso, as misturas SMA requerem um maior custo inicial, devido principalmente à percentagem de ligante relativamente elevada, à maior quantidade de agregados grossos (de melhor qualidade) e à utilização de agentes estabilizadores (fibras). Este elevado custo inicial acaba por ser compensado pela sua durabilidade e baixo custo de manutenção, constituindo uma enorme vantagem para estas misturas.

4 ESTUDO LABORATORIAL DE UMA MBT, DO TIPO SMA, COM MBR

4.1 Enquadramento

Neste capítulo apresenta-se o estudo laboratorial realizado sobre uma mistura betuminosa temperada, do tipo SMA, com incorporação de material betuminoso reciclado e fibras celulósicas, para aplicação em camadas de desgaste.

Os principais trabalhos laboratoriais, desenvolvidos no âmbito desta dissertação foram os seguintes:

- Ensaio de caracterização dos materiais constituintes utilizados;
 - Análise granulométrica dos agregados reciclados constituintes da Mistura betuminosa reciclada (MBR) e determinação da percentagem de betume residual da MBR;
- Fabrico da mistura e moldagem de provetes (cilíndricos e lajetas retangulares);
- Ensaio de caracterização das propriedades volumétricas da mistura e do escorrimento do betume;
 - Baridade, baridade máxima teórica e avaliação do escorrimento do betume;
- Ensaio de avaliação de algumas características mecânicas da mistura;
 - Compressão de Marshall, sensibilidade à água, tração indireta por compressão diametral e wheel-tracking.

4.2 Propriedades dos Materiais Constituintes

4.2.1 Materiais Granulares

Os materiais granulares que foram usados na formulação da mistura em laboratório são de origem granítica à exceção do fíler que é calcário (Figura 4.1). Na Figura 4.2 encontram-se representadas as curvas granulométricas das diferentes frações de agregado natural utilizado.

As suas características físicas, recolhidas nas fichas técnicas do produto, encontram-se resumidas nos Quadros 4.1 a 4.4. Em cada quadro encontram-se ainda indicados, os requisitos físicos mais relevantes, de acordo com NP EN 13043, que os materiais granulares devem apresentar para poderem ser utilizados no fabrico de misturas betuminosas a quente, em

camada de desgaste. Estes requisitos serão aplicáveis às MBT que se destinem a ser utilizadas para os mesmos fins.



Figura 4.1 – Agregados naturais utilizados na mistura

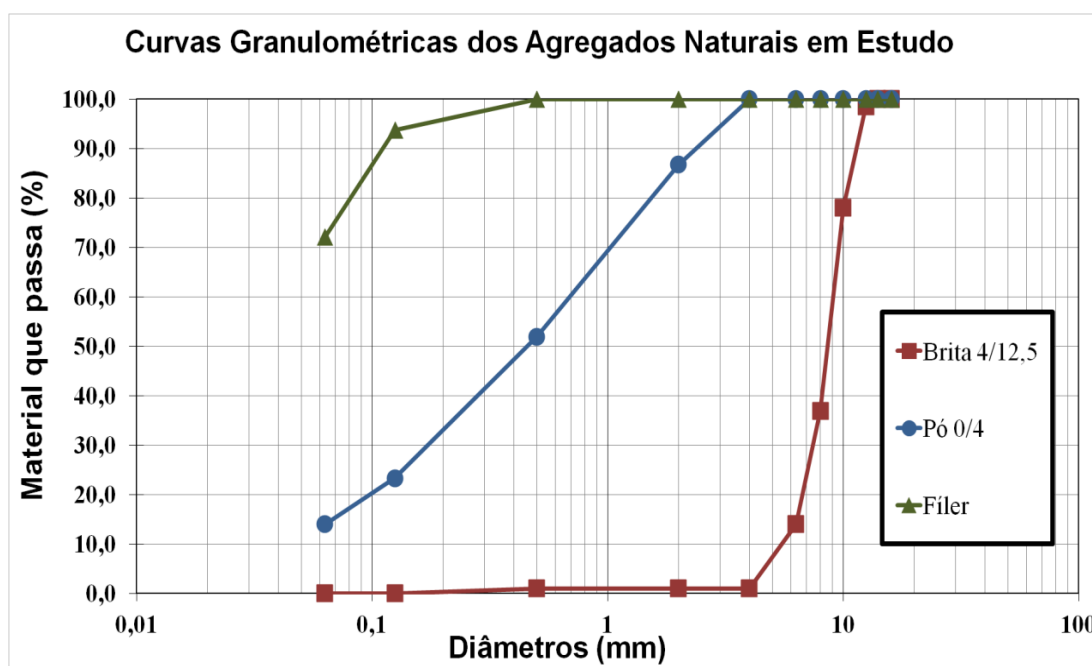


Figura 4.2 – Curvas granulométricas dos agregados naturais em estudo

Quadro 4.1– Granulometria dos materiais granulares usados na formulação da mistura

Peneiros (mm)	16	14	12,5	10	8	6,3	4	2	0,5	0,125	0,063
Material	Material que passa (%)										
Brita 4/12,5	100,00	100,00	98,50	78,00	36,90	14,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
Pó 0/4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	86,70	51,90	23,30	14,00
Fíler	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	93,70	72,10

Quadro 4.2– Características físicas dos agregados de granulometria 4/12,5 mm

Característica	Massa volúmica (Mg/m ³)			Granulometria	FI (%)	SI (%)	LA (%)	M _{DE} (%)
	pa	Prd	pssd					
Material								
Brita 4/12,5	2,65	2,60	2,62	G _C 90/15	FI ₁₅	SI ₂₀	LA ₂₀	M _{DE} 10
NP EN 13043								
Requisitos/ Categoria	A declarar			A declarar	FI ₂₀	ND	LA ₂₀ *	M _{DE} 15

*Para rochas granitoides: LA₃₀

Quadro 4.2– (Continuação) Características físicas dos agregados de granulometria 4/12,5 mm

Característica	Baridade ρ _b (Mg/m ³)	WA (%)	PSV (%)
Material			
Brita 4/12,5	1,38	0,7	PSV ₅₆
NP EN 13043			
Requisitos/ categoria	A declarar	≤ 1	PSV ₅₀

Da análise dos valores apresentados de PSV – coeficiente de polimento acelerado, e M_{DE} – coeficiente de *micro-Deval*, conclui-se que a brita 4/12,5 cumpre a categoria de PSV₅₀ e MDE15, de acordo com a norma NP EN 13043.

Quadro 4.3– Características físicas dos agregados de granulometria 0/4 mm

Característica	Massa volúmica (Mg/m³)			Granulometria	MB _F (g/kg)	Baridade ρb (Mg/m³)	WA (%)
	pa	Prd	ρssd				
Material							
Pó 0/4	2,65	2,62	2,63	G _{A 80}	MB _F 10	1,61	0,4
NP EN 13043							
Requisitos/ categoria	A declarar			A declarar	MB _F 10	A declarar	≤ 1

Quanto aos materiais finos, torna-se necessário ter em conta o valor de adsorção de azul-de-metileno, por forma a analisar a nocividade dos finos. A norma NP EN 13043 estabelece que o valor de azul-de-metileno deve cumprir os requisitos da categoria MB_{F10}. Ao analisar os valores apresentados de MB_F, verifica-se que o pó granítico apresenta limpeza satisfatória para a sua aplicação em misturas betuminosas segundo a NP EN 13043.

Tal como os restantes agregados, o fíler também tem requisitos a cumprir segundo a norma NP EN 13043. No Quadro 4.4, apresentam-se as suas propriedades, verificando-se que cumpre genericamente os requisitos.

Quadro 4.4– Características do fíler utilizado

Característica	Massa volúmica (Mg/m ³)	Vazios de fíler seco compacto – Ridgen (%)	Baridade ρ _b (Mg/m ³)
Material			
Fíler	2,70	32	0,9
NP EN 13043			
Requisitos/categoria	≤ 0,2 Mg/m ³ do valor declarado	u 28/38	Entre 0,5 e 0,9 Mg/m ³ do valor declarado

4.2.2 Mistura Betuminosa Recuperada (MBR)

A Mistura Betuminosa Recuperada (Figura 4.3) usada no fabrico da mistura em estudo foi recolhida por fresagem da camada superficial de um troço da autoestrada A13, e foi sujeita a um conjunto de procedimentos que permitiram a separação e caracterização dos seus materiais elementares (agregado e betume envelhecido).

Em laboratório, foi delimitada a dimensão máxima da MBR, através do peneiro de malha de 16 mm.



Figura 4.3 – Mistura Betuminosa Recuperada proveniente da camada superficial de um troço da autoestrada A13

A determinação da percentagem de betume presente na MBR é fundamental para a formulação da mistura. Aquela percentagem foi obtida pelo método de incineração, segundo a norma EN 12697-39, submetendo a MBR a um ciclo de incineração numa mufla (Figura 4.4).



Figura 4.4 – Equipamento utilizado na determinação da percentagem de betume e aspeto geral do material ensaiado

Este ensaio foi realizado para três amostras de MBR, de modo a avaliar a variabilidade da sua percentagem de betume. No Quadro 4.5 apresentam-se, de forma resumida, os resultados obtidos para as três amostras ensaiadas, tendo-se obtido a uma percentagem média de betume de 4,9 %.

Quadro 4.5 – Percentagem de betume de três amostras da MBR

Amostra	Massa total (g)	Massa de agregado (g)	Fator de correção	Massa de betume corrigida (g)	Percentagem de betume (%)
MBR 1	2537,0	2402,5	1,00532	121,7	4,8
MBR 2	3124,5	2954,3	1,00532	154,5	4,9
MBR 3	2445,1	2313,8	1,00532	119,0	4,9

Segundo Baptista (2006), para taxas de reciclagem até cerca de 20% a caracterização do betume da MBR é dispensada, visto ter pouca influência nas características do betume final. Tendo em conta, que no caso em estudo a taxa de reciclagem a utilizar seria relativamente baixa, não se realizaram ensaios de caracterização do betume da MBR.

Após a incineração do betume existente na MBR, prepararam-se três amostras de agregado para análise granulométrica, realizada de acordo com as regras definidas nas normas NP EN 933-1 (para agregados) e EN 12697-2 (para agregados das misturas betuminosas), tendo sido utilizado, como principal equipamento, um conjunto de peneiros da marca *Impact* e um peneirador automático da marca *Rotasift* (Figura 4.5).



Figura 4.5 – Conjunto de peneiros (esquerda), peneirador automático (centro) e peneiração manual (direita)

O processo de peneiração foi efetuado inicialmente com o auxílio do peneirador automático, durante 30 minutos, sendo seguido de uma peneiração manual, com o objetivo de aumentar o rigor do ensaio.

Na Figura 4.6 pode observar-se a curva granulométrica de cada uma das amostras ensaiadas, bem como a curva granulométrica final resultante da curva média das amostras.

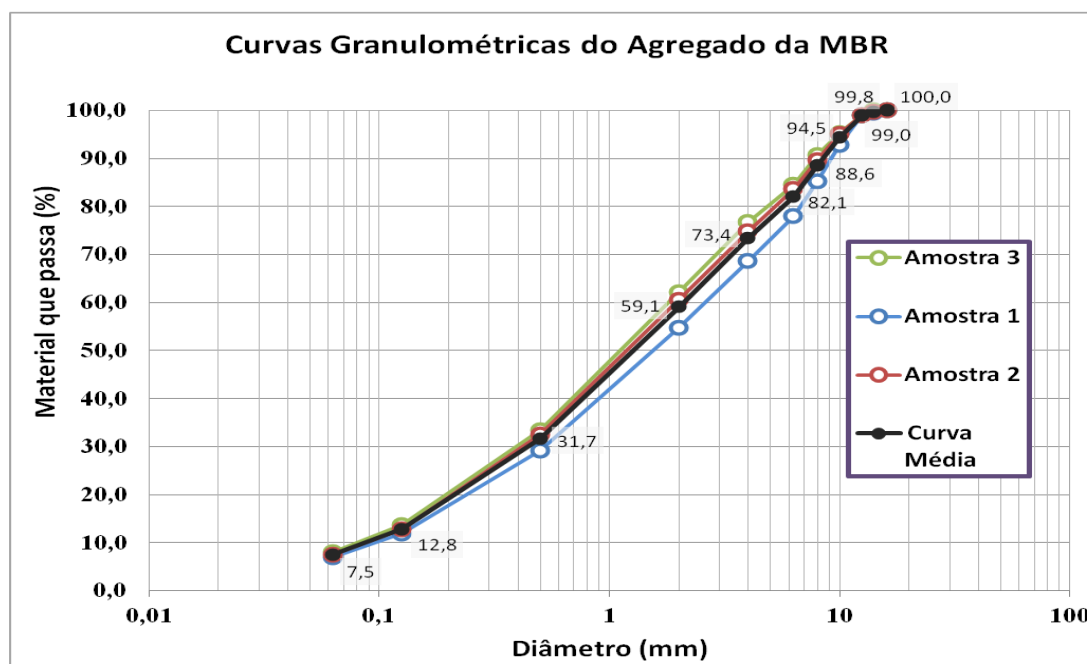


Figura 4.6 – Curvas granulométricas do agregado da MBR

Posteriormente, fizeram-se as análises granulométricas de diferentes frações da MBR, uma fina e outra grossa, com granulometrias de 0/8mm e 8/16mm, respetivamente. O procedimento realizado foi em tudo idêntico ao já referido acima.

A percentagem média de betume obtida foi de 6,3 % e 4,6 %, respetivamente para a fração 0/8mm e 8/16mm. Na Figura 4.7 pode observar-se o agregado da MBR referente a cada uma das frações em estudo, para posterior estudo granulométrico. As curvas granulométricas resultantes encontram-se representadas na Figura 4.8.



Figura 4.7 – Amostra do Agregado da MBR: a) referente à fração 8/16 mm; b) referente à fração 0/8 mm

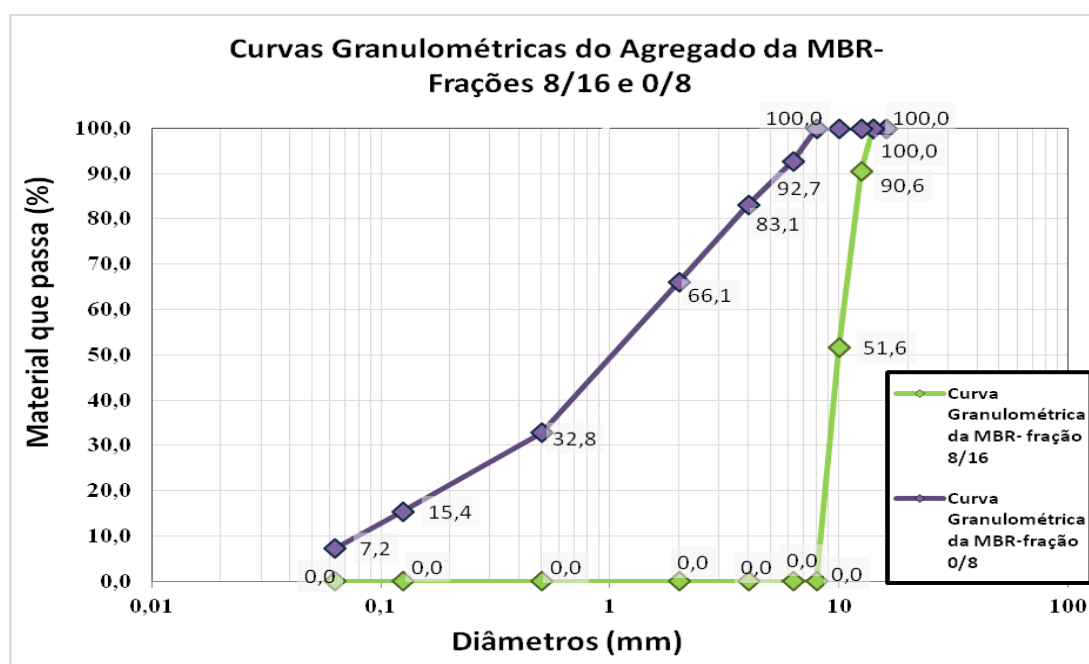


Figura 4.8 – Curvas granulométricas do agregado da MBR – Frações 8/16 e 0/8 mm

Nos Quadros I.1, I.2, I.3, I.4, I.5 e I.6 do apêndice I, apresentam-se de forma integral os resultados da análise granulométrica do agregado da MBR, na sua totalidade e para as frações de 8/16mm e 0/8mm.

Para efeitos de avaliação do agregado da MBR foram determinadas ainda, outras propriedades consideradas importantes para o fabrico e aplicação de misturas betuminosas, tais como: a massa volúmica do agregado e a sua absorção de água. Estas propriedades influenciam a densidade da mistura betuminosa produzida. A absorção de água é considerada um indicador

de durabilidade, visto que materiais com maior absorção de água têm maior sensibilidade à ação do gelo e, além disso, tendem a absorver mais betume durante o processo de fabrico, o que leva a que uma menor quantidade de betume envolva os agregados (Sardão, 2012).

Nos quadros 4.6 e 4.7 apresentam-se os valores finais obtidos na determinação da massa volúmica e absorção de água do agregado da MBR, correspondente à fração de 0/8 mm e 8/16mm, respetivamente. Estes resultados correspondem aos valores médios com ponderação das massas volúmicas dos agregados, quer com dimensões inferiores a 4mm, determinados pelo método do picnómetro, quer com dimensões superiores a 4 mm, determinados pelo método do cesto de rede metálica. Nestes ensaios foram seguidos os procedimentos definidos na norma NP EN 1097-6 – Determinação da massa volúmica e da absorção de água.

Quadro 4.6 – Massa volúmica dos agregados da fração 0/8 da MBR com ponderação dos valores obtidos para partículas inferiores e superiores a 4 mm

Massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a):	2,640
Massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}):	2,570
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}):	2,596
Água absorvida (WA_{24}):	1,023

Quadro 4.7 - Massa volúmica dos agregados da fração 8/16 da MBR com ponderação dos valores obtidos para partículas inferiores e superiores a 4 mm

Massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a):	2,602
Massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}):	2,558
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}):	2,574
Água absorvida (WA_{24}):	0,644

Os resultados integrais, obtidos na determinação da massa volúmica do agregado da MBR, encontram-se nos quadros I.8 a I.13 do apêndice I.

4.2.3 Betume Asfáltico

O betume novo utilizado na formulação da mistura em estudo foi da classe 35/50. A escolha deste tipo de betume deveu-se ao facto de atualmente ser o mais utilizado em Portugal na construção/reabilitação de pavimentos flexíveis. Este betume foi fornecido pela *Repsol*.

No Quadro 4.8 apresentam-se as características do betume utilizado, conforme o que consta na ficha do produto, e certifica-se o cumprimento dos requisitos exigidos pela norma EN 12591.

Quadro 4.8 – Características do betume 35/50

Características	Betume 35/50	NP EN 12591
Penetração (mm) [25°C; 100g; 5s]	41	35-50
Temperatura de amolecimento (°C)	55,4	50-58
Viscosidade cinemática (mm ² /s) [135°C]	686,2	≥ 370

4.2.4 Aditivo

O aditivo utilizado na composição da mistura, de acordo com a ficha de produto, é constituído por 40% de ceras (com o nome comercial: *Sasobit*®), obtidas pelo processo *Fischer-Tropsch*, e 60% de fibras naturais de celulose com betume. Sendo comercialmente designado por *Viatop CT 40*®, representado na Figura 4.9. Este aditivo foi fornecido pela JRS.



Figura 4.9 – *Viatop CT 40*®

A escolha deste aditivo foi feita tendo como objetivo a formulação de uma mistura betuminosa temperada, do tipo SMA.

No Quadro 4.9 apresentam-se as características do *Viatop CT 40[®]*, conforme o que consta na ficha do produto.

Quadro 4.9 – Características do *Viatop CT 40[®]*

Características	<i>Viatop CT 40[®]</i>
Aspeto	Grânulos cilíndricos
Conteúdo de fibras	≈ 60%
Conteúdo de ceras Fischer-Tropsch	≈ 40%
Comprimento médio dos grânulos	3 a 12 mm
Diâmetro médio dos grânulos	3,5 ± 1 mm
Densidade aparente	430 a 570 g/l

4.3 Estudo da Mistura de Agregados

A curva granulométrica da mistura em estudo foi obtida através da junção dos diversos agregados disponíveis, em quantidades diferentes, tendo sempre como referência as indicações da norma EN 13108-5, para misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt*. De acordo com esta norma, a curva granulométrica da mistura, deverá cumprir os limites definidos no Quadro 4.10, referentes à percentagem de passados num conjunto de quatro peneiros, denominados de 1,4D, D, 2 mm e 0,063 mm, valores estes correspondem à abertura da malha em mm, e que no caso em estudo (SMA 12,5) são 20, 12,5, 2 e 0,063 mm, respetivamente.

Quadro 4.10 – Limites da composição [adaptado de (EN 13108-5:2006)]

D	4	6 (6,3)	8	10	12 (12,5)	14	16	20
Peneiro (mm)	Passados no Peneiro % Em massa total							
1,4 D^a	100	100	100	100	100	100	100	100
D	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100
2	25 a 45	20 a 40	20 a 40	20 a 35	20 a 35	15 a 30	15 a 30	15 a 30
0,063	5 a 14	5 a 14	5 a 14	5 a 13	5 a 13	5 a 12	5 a 12	5 a 12
^a Quando o valor calculado não é exato segundo a série ISO 565/R20 deve-se adotar o valor de peneiro mais próximo no conjunto.								

Os limites granulométricos definidos pela norma EN 13108-5 para misturas SMA 12,5, são apresentados graficamente na Figura 4.10.

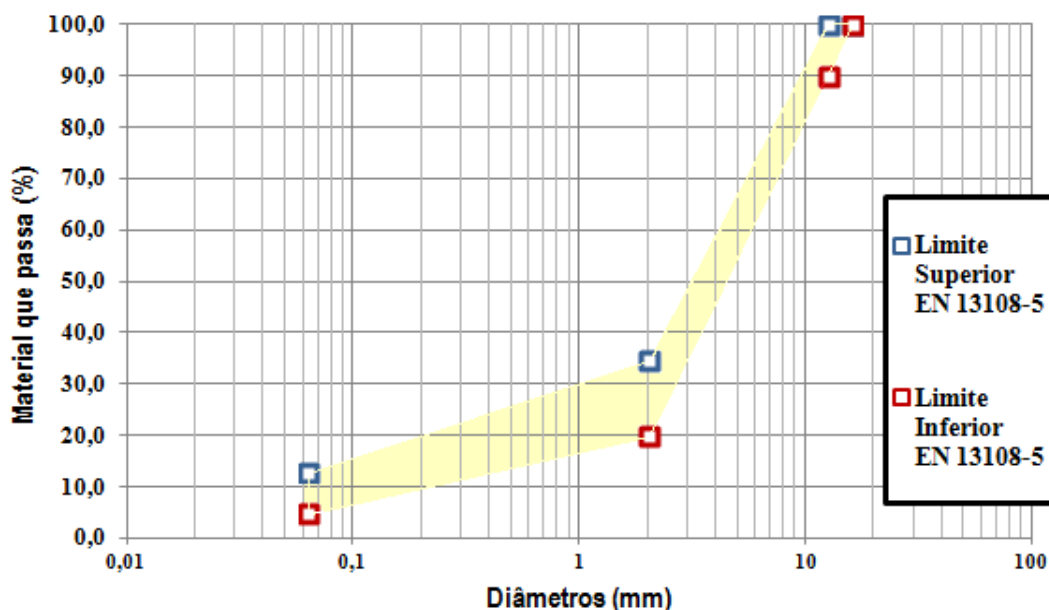


Figura 4.10 – Limites granulométricos protagonizados na EN 13108-5

De acordo com os resultados das análises granulométricas de cada um dos agregados constituintes da mistura, e tendo por objetivo obter um material granular final cuja curva granulométrica cumpra os pontos de controlo apresentados na Figura 4.10, foram calculadas, com o auxílio de uma folha de cálculo e observando a evolução do resultado em gráfico, as percentagens de cada uma das frações de agregado na mistura final. É importante referir que este processo foi alvo de várias tentativas, tendo em conta não só o cumprimento dos limites definidos na norma EN 13108-5 mas também o aspeto pretendido da mistura após compactação, visto se tratar de um *Stone Mastic Asphalt*.

Na Figura 4.11 apresentam-se duas tentativas, realizadas em laboratório, para obtenção de uma mistura com um esqueleto de agregado típico de um SMA.

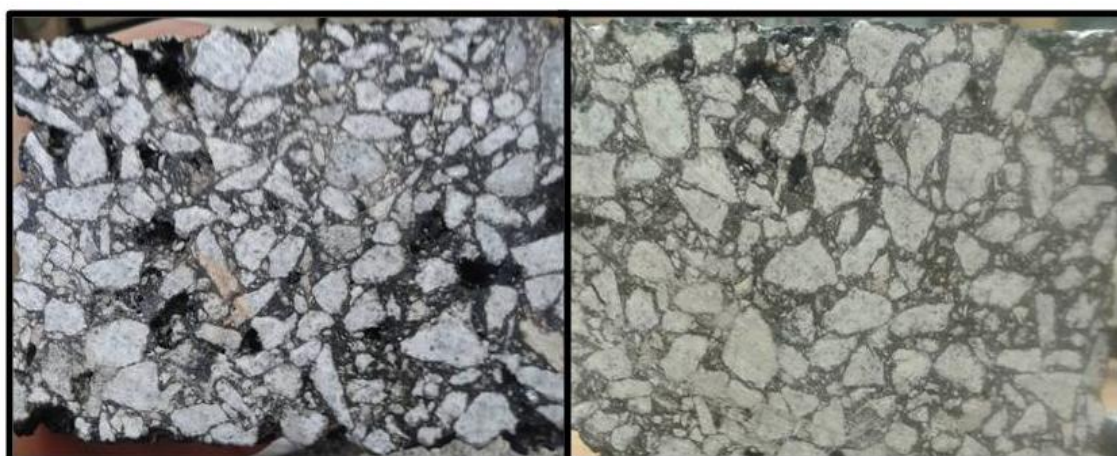


Figura 4.11 – Tentativas para obtenção de uma mistura com um esqueleto de agregado típico de uma mistura do tipo SMA

As misturas da Figura 4.11, embora cumpram os limites preconizados na norma EN 13108-5, não foram adotadas neste trabalho, pelo facto de não terem exatamente o esqueleto pretendido. Apesar de ser notório em ambas as misturas, o esqueleto de agregado grosso, característico de misturas do tipo SMA, existe uma forte carência de mástique (betume + fíler + agregados finos + aditivo) a envolver as partículas de agregado.

Deste modo, foi necessário proceder-se, uma vez mais, à reformulação das percentagens de cada uma das frações de agregado na mistura, optando-se, desta vez, por separar a MBR em duas frações, uma grossa (material retido no peneiro de 8 mm) e outra fina (material que passa no peneiro de 8 mm), com o intuito de obter uma curva granulométrica mais próxima do limite inferior da zona definida pelos pontos de controlo da EN 13108-5, fator considerado relevante para a obtenção de características satisfatórias na mistura, de acordo com resultados obtidos noutros estudos. Na Figura 4.12 apresenta-se o aspeto final da mistura SMA adotada neste estudo.



Figura 4.12 – Aspeto final da estrutura da mistura (SMA), em estudo nesta dissertação

As percentagens de cada fração de agregado na mistura final são as apresentadas no Quadro 4.11. A curva granulométrica da respetiva mistura encontra-se na Figura 4.13 juntamente com os pontos de controlo considerados na EN 13108-5.

O estudo da mistura de agregados apresenta-se de forma integral no Quadro I.7 do apêndice I, e na Figura I.1 do mesmo apêndice apresenta-se o andamento das curvas granulométricas de cada agregado que incorpora a mistura.

Quadro 4.11 – Percentagem de cada fração de agregado contido na mistura de agregado

Agregado	Percentagem da massa total (%)
Brita 4/16	62
Pó 0/4	10
Fíler	8
MBR 8/16	12
MBR 0/8	8

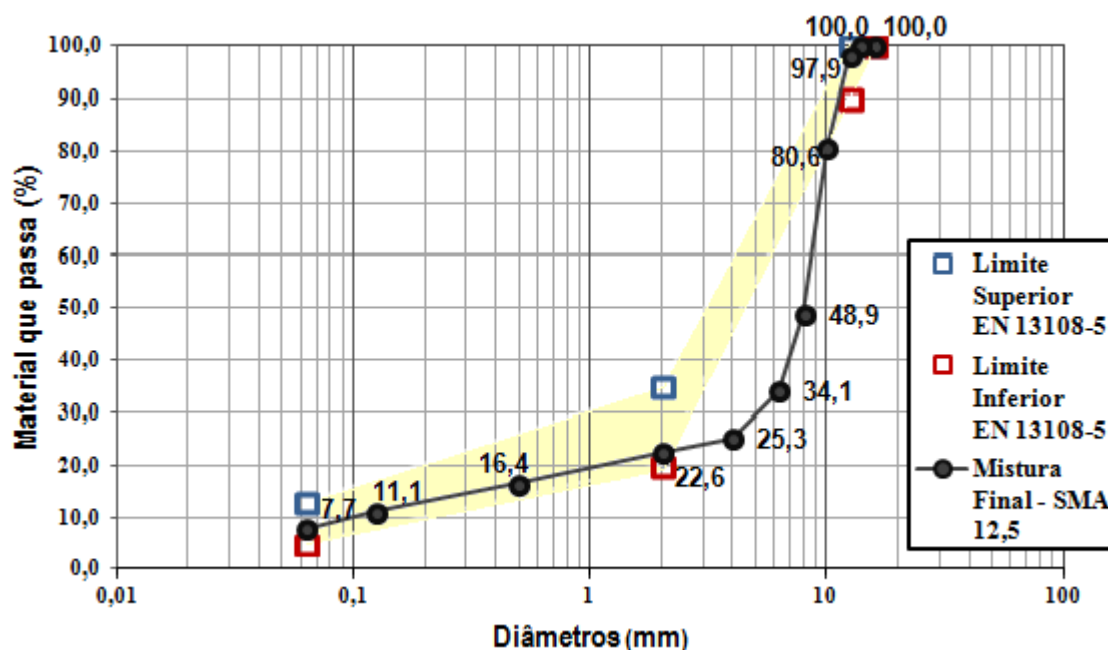


Figura 4.13 – Granulometria da mistura em estudo (SMA 12,5) em comparação com os limites definidos na EN 13108-5

Por observação da Figura 4.13 constata-se que a curva granulométrica da mistura final cumpre os limites granulométricos pretendidos. No entanto, o facto dos pontos de controlo serem relativamente dispersos e apenas a 4 pontos, faz com que o cumprimento dos limites granulométrico indicados possam não ser suficientes para se obter uma mistura SMA com a estrutura necessária (Gardete et al, 2011). Deste modo, sendo a granulometria de uma mistura fundamental para a obtenção das características desejadas, torna-se importante comparar os limites granulométricos definidos na norma EN 13108-5 com outros limites utilizados a nível europeu ou mesmo em diferentes regiões do mundo. Como exemplo, apresentam-se de seguida comparações entre diversos limites granulométricos definidos em vários países, nomeadamente, nos EUA (Prowell et al, 2009), na Espanha (Proyecto SMA, 2014), na Alemanha (Drüschner et al, 2000) e na Suécia (EAPA, 1998), e a curva granulométrica da mistura em estudo.

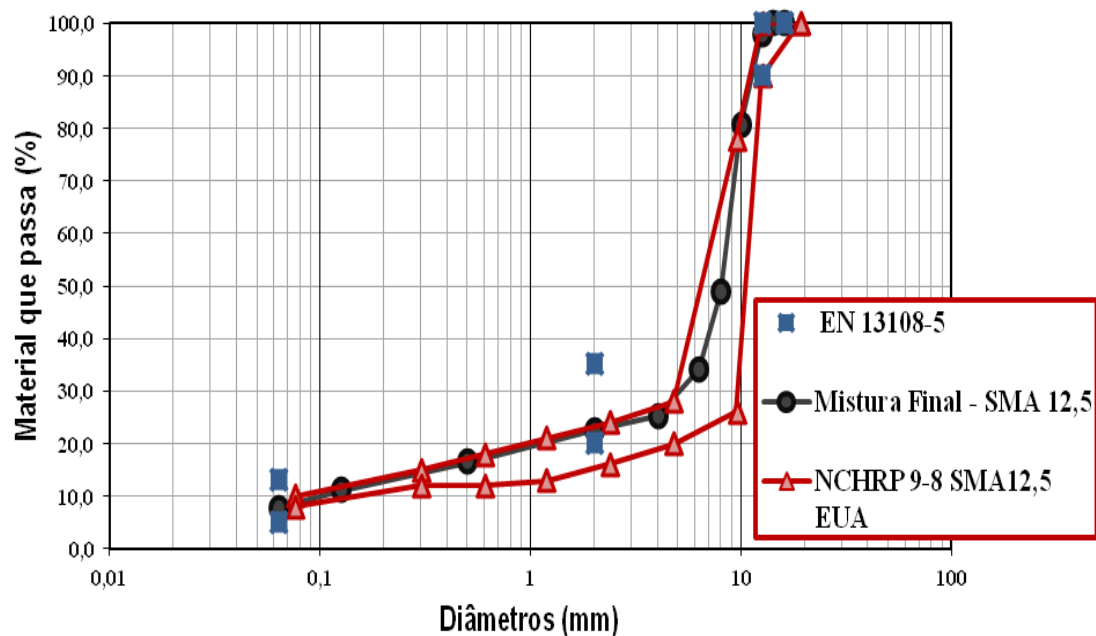


Figura 4.14 – Comparação entre os limites granulométricos definidos no projeto NCHRP 9-8 e na EN 13108-5 com a granulometria da mistura final

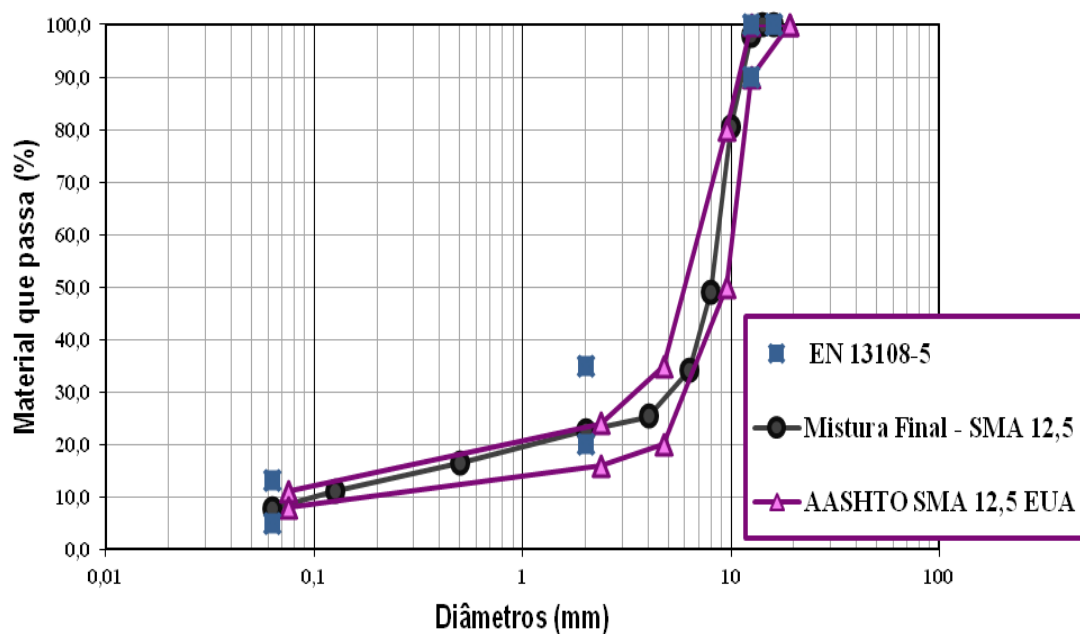


Figura 4.15 – Comparação entre os limites granulométricos definidos na especificação da AASHTO e na EN 13108-5 com a granulometria da mistura final

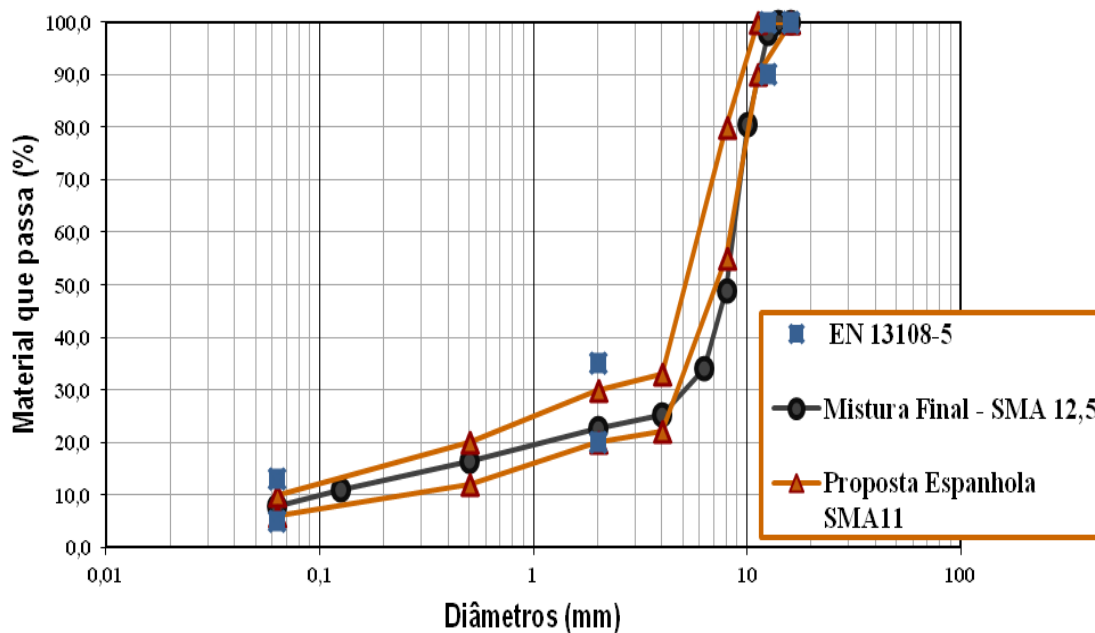


Figura 4.16 – Comparação entre os limites granulométricos definidos na Proposta Espanhola e na EN 13108-5 com a granulometria da mistura final

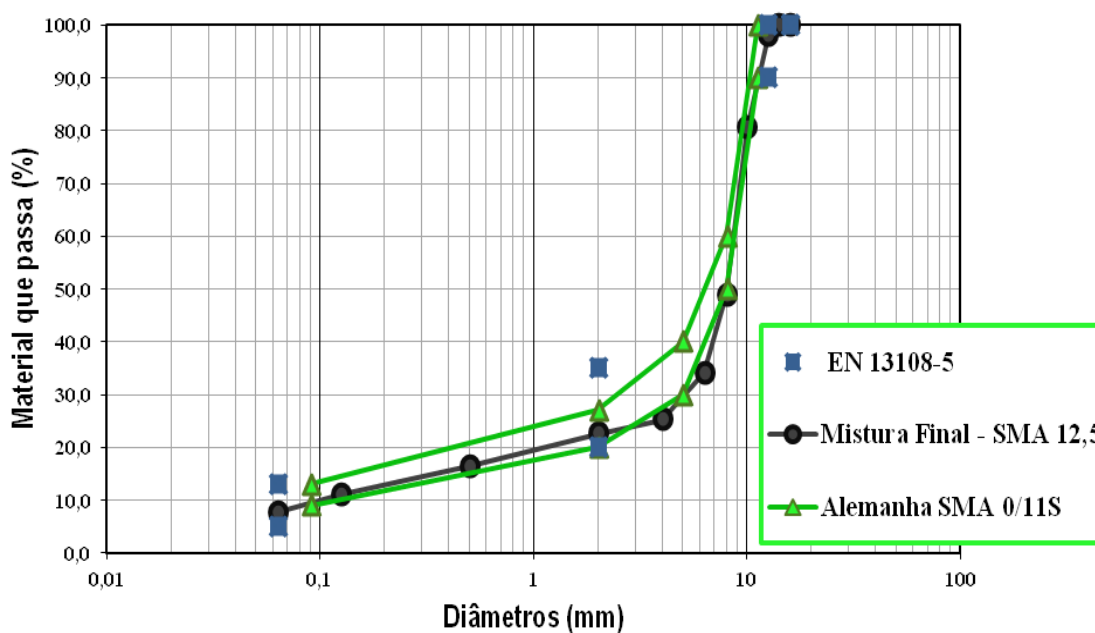


Figura 4.17 – Comparação entre os limites granulométricos definidos na Alemanha e na EN 13108-5 com a granulometria da mistura final

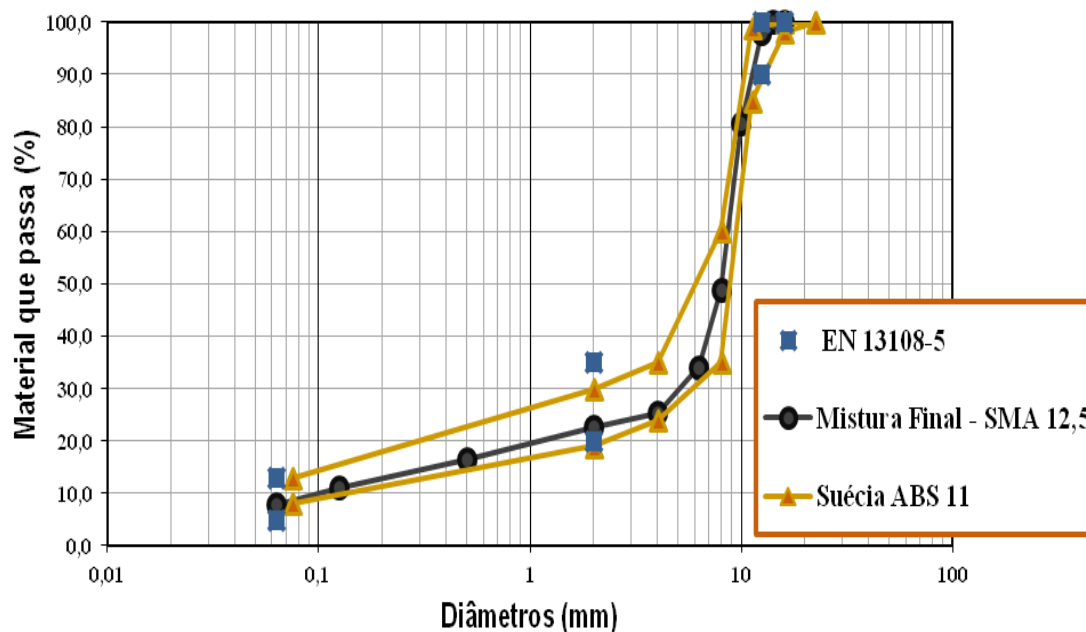


Figura 4.18 – Comparação entre os limites granulométricos definidos na Suécia e na EN 13108-5 com a granulometria da mistura final

Da observação dos gráficos acima expostos pode concluir-se, de modo geral, que a principal diferença entre os diversos fusos granulométricos apresentados e os pontos de controlo protagonizados na norma EN 13108-5, considerando a existência de uma envolvente delimitada por estes, está relacionada com a percentagem de agregado que passa entre os peneiros de 8 e 2 mm. Isto é, comparando o andamento dos diversos fusos granulométricos apresentados com a “envolvente fictícia” dos limites definidos na norma EN 13108-5, verifica-se que esta tende a considerar uma menor percentagem de grossos na mistura, comparativamente a qualquer outro dos fusos analisados.

Por outro lado, observa-se que a granulometria da mistura em estudo se enquadra dentro dos fusos granulométricos definidos no projeto NCHRP 9-8, na especificação da AASHTO e na especificação sueca contrariamente com o que acontece em relação à “envolvente fictícia” da norma EN 13108-5.

4.4 Fabrico da Mistura e Moldagem de Provete

Neste subcapítulo descreve-se o processo de produção e moldagem de misturas betuminosas em laboratório.

Visto se tratar-se de uma mistura betuminosa temperada, e tendo em conta que o material betuminoso fresado foi introduzido, na mistura, à temperatura ambiente, a determinação da temperatura de aquecimento dos agregados naturais tornou-se um fator essencial, de modo a

produzir misturas com a temperatura de preparação pretendida, que no caso em estudo é de 120° C.

A temperatura de aquecimento dos agregados naturais foi determinada, segundo Batista (2006), tendo em conta o equilíbrio térmico no fabrico de misturas betuminosas, sabendo que:

- a taxa de reciclagem da mistura (pF) = 20%;
- a percentagem de filler na mistura = 8%;
- a humidade no material fresado = 0%;
- a percentagem de betume novo na mistura = 6,5%;
- a percentagem de agregados novos na mistura (pa) = 74,6%

A relação entre a massa de material fresado e a massa de agregado é dada pela seguinte expressão:

(4.1)

$$R = \frac{pF}{pa} = \frac{0,20}{0,746} = 0,27$$

Admitindo que a temperatura do material fresado é de 20°C e que as perdas de calor em laboratório correspondem a uma correção $\Delta T_a = 10\%$, para obter uma temperatura de 120°C, a temperatura de aquecimento dos agregados será dada pela seguinte expressão:

(4.2)

$$T_a = T_m \times (1 + R) - R \times T_F + 5 \times R \times h \times (637 - T_F) + \Delta T_a$$

onde,

T_a – temperatura de aquecimento dos agregados (°C);

T_m – temperatura final da mistura betuminosa (°C);

ΔT_a – fator de correção de T_a devido às perdas de calor (°C);

R – relação entre a massa de material fresado e a massa dos agregados novos;

T_F – temperatura inicial do material fresado (°C);

H – humidade do material fresado.

$$T_a = 120 \times (1 + 0,27) - 0,27 \times 20 + 5 \times 0,27 \times 0 \times (637 - 20) + 10 = 157 \approx 160^\circ \text{ C}$$

Com base no resultado obtido, os agregados naturais foram aquecidos na estufa ventilada à temperatura de 160° C.

O betume utilizado foi da classe 35/50 e foi mantido, na estufa ventilada, à temperatura de 140°C.

Antes de iniciar o fabrico de cada uma das amassaduras, os agregados naturais foram secos na estufa, até peso constante, com o objetivo de eliminar qualquer possível humidade presente nestes.

O processo de produção de misturas foi, no essencial, o mesmo para os dois tipos de provetes produzidos e foi efetuado de acordo com as regras definidas na norma EN 12697-35.

Os procedimentos efetuados encontram-se ilustrados na Figura 4.19.

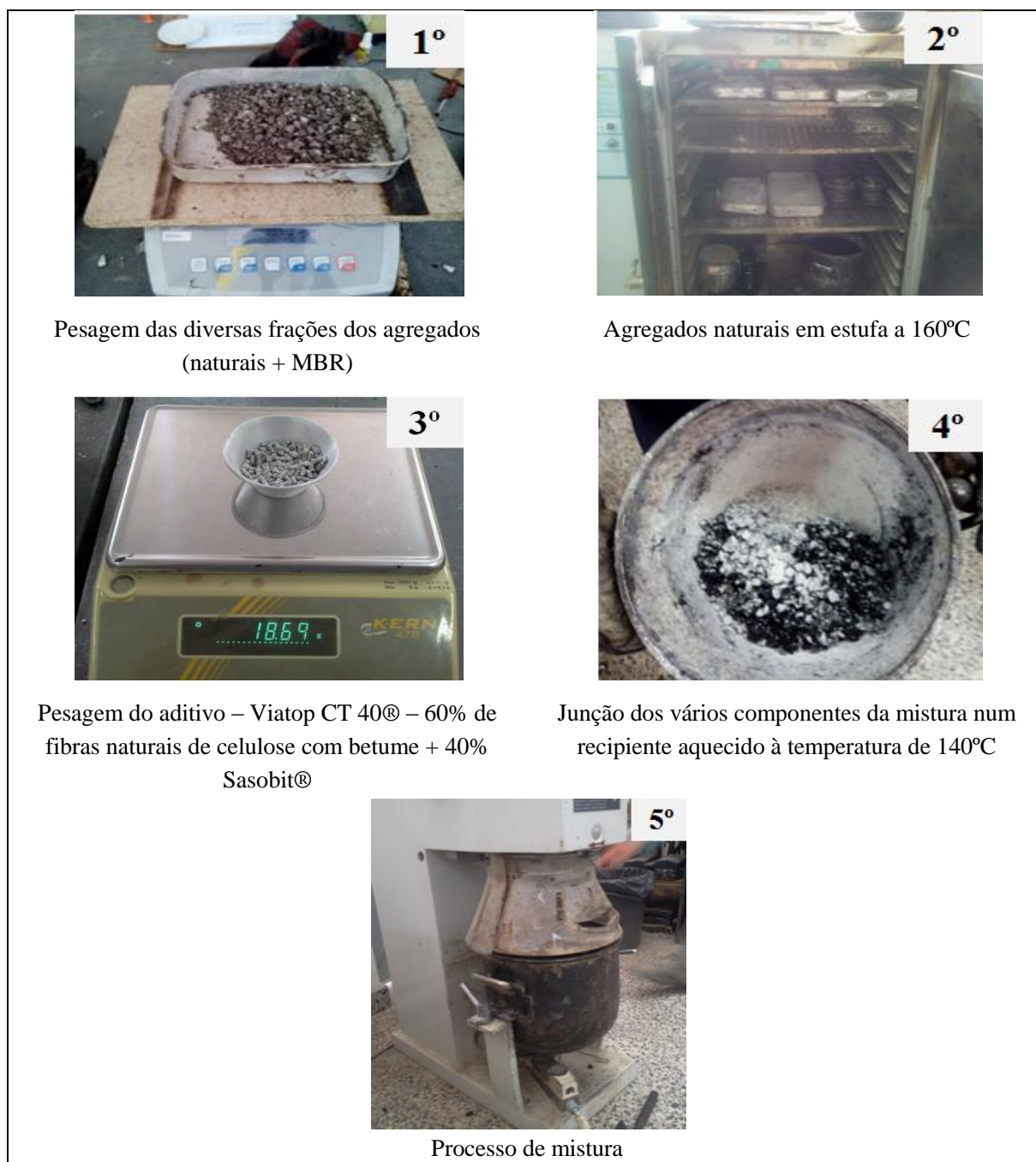


Figura 4.19 – Produção da mistura betuminosa

A norma EN 12697-35 especifica que o tempo máximo de mistura, no caso de um *Stone Mastic Asphalt*, é de 4 minutos porém, tendo em conta a inclusão do aditivo e do MBR (adicionado à temperatura ambiente), este tempo foi acrescido de 1 minuto, passando assim a ser 5 minutos.

A temperatura definida para início de compactação, no caso de misturas temperadas, é de cerca de 110°C. Deste modo, a mistura foi colocada dentro dos moldes antes de atingir uma temperatura próxima da definida para início de compactação.

4.4.1 Provetes Cilíndricos

O procedimento para o fabrico de provetes cilíndricos encontra-se representado na Figura 4.20. O mesmo consiste em produzir a mistura betuminosa, colocar no molde cilíndrico, e proceder à compactação do material.



Figura 4.20 – Moldagem de provetes cilíndricos

A moldagem de provetes foi feita com um compactador de impacto da marca *Matest*, tendo sido seguidas as regras definidas na norma EN 12697-30. Este método consiste em compactar de forma dinâmica provetes cilíndricos, com um diâmetro de $101,6 \pm 0,1$ mm e uma altura de $63,5 \pm 2,5$ mm, através da queda de uma massa de 4,5 kg de uma altura de 0,45 m, com a aplicação de 50 pancadas em cada face do provete.

Finalizada a compactação, os provetes foram arrefecidos à temperatura ambiente, e de seguida retirados do molde, através de um dispositivo de extrusão equipado com um macaco hidráulico.

No Quadro II.1 do apêndice II apresentam-se as dosagens de material granular e de betume incorporadas na mistura betuminosa para a realização dos provetes Marshall.

4.4.2 Lajetas

Na moldagem de lajetas foram seguidas as regras definidas na norma EN 12697-33 e foi utilizado, como equipamento principal, um compactador de rolos metálicos da marca *Weber*.

O procedimento para a elaboração das lajetas encontra-se representado na Figura 4.21. O mesmo consistiu em produzir a mistura betuminosa, colocar no molde de madeira com as dimensões pretendidas ($40 \times 30 \times 4$ [cm³]), e proceder à compactação do material.

Foram realizadas seis lajetas, duas das quais com 6,0% de betume, outras duas com 6,5% de betume e as duas restantes com 7,0% betume.



Figura 4.21 – Moldagem de lajetas



Figura 4.21 (Continuação) – Moldagem de lajetas

No Quadro II.2 do apêndice II apresentam-se as dosagens de material granular e de betume incorporadas na mistura betuminosa para a realização das lajetas.

4.5 Caracterização Volumétrica e Avaliação do Escorrimento pelo Método de Schellenberg

4.5.1 Propriedades Volumétricas

Um dos principais objetivos deste trabalho consiste na determinação, a partir de ensaios realizados sobre provetes Marshall, de várias propriedades volumétricas caracterizadoras da mistura betuminosa em estudo.

Em laboratório foram produzidos provetes para três percentagens em betume, de 6%, 6,5% e 7%, para cada um destes foram determinadas as seguintes propriedades: baridade, baridade máxima teórica, porosidade, VMA, VFB, estabilidade e deformação (estas duas últimas determinadas no ensaio de compressão de Marshall). O valor destas propriedades resulta da média dos valores obtidos em cada um dos quatro provetes ensaiados, para cada percentagem de betume.

De seguida são apresentados os procedimentos para determinação das propriedades volumétricas referidas.

➤ Baridade

A determinação da baridade aparente, ρ_b , efetuou-se segundo a norma EN 12697-6, seguindo o procedimento C (sealed specimen, SS), utilizado para amostras com superfície aberta ou grosseira, como o caso das misturas do tipo SMA.

Na Figura 4.22 ilustra-se o procedimento para a determinação da baridade dos provetes.



Figura 4.22 – Determinação da baridade aparente dos provetes

O cálculo da baridade de cada provete foi efetuado recorrendo à expressão (4.3):

(4.3)

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{\frac{m_2 - m_3}{\rho_w} - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}}$$

onde:

ρ_{bsea} – é a massa volúmica (provete selado) (kg/m^3);

m_1 – é a massa do provete seco (g);

m_2 – é a massa do provete selado com parafina seco (g);

m_3 – é a massa do provete selado com parafina imerso (g);

ρ_w – é a densidade da água à temperatura do ensaio (kg/m^3);

ρ_{sm} – é a densidade da parafina (kg/m^3).

A densidade da água à temperatura do ensaio foi determinada de acordo com o Quadro 4.12.

Quadro 4.12 – Densidade da água em função da sua temperatura (EN 12697-6)

Temperatura da água (°C)	Fator de correção, K	Densidade da água, ρ_w (kg/m^3)	Temperatura da água (°C)	Fator de correção, K	Densidade da água, ρ_w (kg/m^3)
10	1,0027	999,8	20	1,0012	998,3
11	1,0026	999,7	21	1,0010	998,1
12	1,0025	999,6	22	1,0007	997,8
13	1,0023	999,4	23	1,0005	997,6
14	1,0022	999,3	24	1,0003	997,4
15	1,0021	999,2	25	1,0000	997,1
16	1,0019	999,0	26	0,9997	996,8
17	1,0017	998,8	27	0,9995	996,6
18	1,0016	998,7	28	0,9992	996,3
19	1,0014	998,5	29	0,9989	996,0
20	1,0012	998,3	30	0,9986	995,7

A densidade da parafina utilizada neste ensaio, à temperatura de 25°C, é de 875 kg/m^3 .

No Quadro 4.13 apresentam-se os valores médios das baridades obtidas para cada percentagem de betume. Os resultados obtidos na realização deste ensaio encontram-se integralmente apresentados no apêndice II (Quadros II.4).

Quadro 4.13 – Valores médios das baridade dos provetes

Betume (%)	Baridade média (kg/m ³)
6,0	2275
6,5	2282
7,0	2302

Da análise dos resultados obtidos pode concluir-se que o aumento da percentagem de betume contribui para o aumento da baridade da mistura betuminosa. Deste modo, é de esperar que a porosidade dos provetes com maior percentagem de betume seja inferior à porosidade dos provetes realizados com menor percentagem.

➤ Baridade Máxima Teórica

A determinação da baridade máxima teórica efetuou-se segundo a norma EN 12697-5, seguindo o procedimento A e C.

O procedimento C descreve o método matemático. Neste método a baridade máxima teórica das misturas betuminosas (sem vazios) é determinada a partir da expressão (4.4), que considera a massa volúmica de cada material na mistura.

(4.4)

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\frac{pb}{\rho_b} + \sum_{i=1}^n \frac{pi}{\rho_i}}$$

onde:

ρ_{mc} – baridade máxima teórica da mistura determinada por cálculo, (kg/m³);

ρ_b – massa volúmica do ligante, (kg/m³);

ρ_i – massa volúmica de cada agregado, (kg/m³);

pb – percentagem de betume na mistura, (%);

pi – percentagem de cada agregado na mistura, (%).

A massa volúmica de cada agregado encontra-se apresentada no Quadro II.3. do apêndice II. A massa volúmica considerada para o betume utilizado (35/50) foi de 1030 kg/m³.

No Quadro 4.14 apresentam-se as baridades máximas teóricas, para cada percentagem de betume, obtidas pelo procedimento matemático.

Quadro 4.14 – Baridade máxima teórica da mistura (calculada)

Betume (%)	Baridade Máxima Teórica (kg/m ³)
6,0	2383
6,5	2366
7,0	2350

Pela análise do Quadro 4.14 verifica-se que a baridade máxima teórica, pelo procedimento matemático, tende a diminuir quando se aumenta a percentagem de betume na mistura. Tal acontecimento deve-se ao facto de o aumento da percentagem de betume na mistura betuminosa implicar uma redução da percentagem agregados na mesma, isto é, quando se aumenta um constituinte com menor massa volúmica está a reduzir-se um constituinte com maior massa volúmica fazendo com que a baridade máxima teórica diminua.

O procedimento A descreve o método volumétrico. Neste método a baridade máxima teórica das misturas (sem vazios) é determinada a partir do quociente entre a massa seca da amostra e o seu volume. Este método encontra-se ilustrado na Figura 4.23.



Figura 4.23 – Determinação da baridade máxima teórica



Figura 4.23 (Continuação) – Determinação da baridade máxima teórica

A determinação da baridade máxima teórica de cada mistura betuminosa (sem vazios), pelo método volumétrico, foi efetuado recorrendo à expressão (4.5):

(4.5)

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times V_p - (m_3 - m_2) / \rho_w}$$

onde:

ρ_{mv} – é a baridade máxima teórica da mistura betuminosa, determinada pelo método volumétrico (kg/m^3);

m_1 – é a massa do picnómetro mais a tampa (g);

m_2 – é a massa do picnómetro mais a tampa e a amostra (g);

m_3 – é a massa do picnómetro mais a tampa, a amostra e a água (g);

V_p – é o volume do picnómetro, cheio de água até à marca de referência (m^3);

ρ_w – é a densidade da água à temperatura do ensaio (kg/m^3).

No Quadro 4.15 apresentam-se as baridades máximas teóricas da mistura, para cada percentagem de betume, obtidas experimentalmente.

Os resultados obtidos na realização destes ensaios apresentam-se integralmente no apêndice II (Quadro II.5).

Quadro 4.15 – Baridade máxima teórica

Betume (%)	Baridade Máxima Teórica (kg/m ³)
6,0	2390
6,5	2334
7,0	2363

Pela análise do Quadro 4.15 verifica-se que para a mistura com 6,5% de betume o valor da baridade máxima teórica não está de acordo com a evolução esperada verificada no método matemático.

➤ Porosidade, VMA e VFB

A determinação das propriedades volumétricas dos provetes, tais como a porosidade, o volume de vazios na mistura de agregados e o volume de vazios preenchidos com betume, foi efetuada de acordo com os procedimentos de cálculo definidos na norma EN 12697-8, com base nos valores obtidos para a baridade dos provetes e para a baridade máxima teórica da mistura.

A porosidade de uma mistura betuminosa compactada é o volume de ar retido entre as partículas de agregado, expresso como uma percentagem do volume total da mistura, calculada de acordo com a expressão (4.6):

(4.6)

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} (\times 100\%)$$

onde:

V_m – porosidade de uma mistura (%);

ρ_m – baridade máxima teórica da mistura betuminosa (kg/m³);

ρ_b – baridade do provete (kg/m³).

Os vazios da mistura de agregados (VMA) correspondem ao volume dos vazios entre as partículas de agregado sem considerar o betume de uma mistura betuminosa compacta. Por outro lado, os vazios preenchidos por betume (VFB) dizem respeito à percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume.

O VMA e o VFB foram calculados de acordo com as expressões (4.7) e (4.8) respetivamente.

(4.7)

$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B} (\%)$$

(4.8)

$$VFB = \frac{\frac{B \times \rho_b}{\rho_B}}{VMA} (\times 100\%)$$

onde:

VMA – percentagem de vazios na mistura de agregados (%);

B – percentagem de betume do provete (em 100% da mistura) (g);

ρ_B – densidade do betume (kg/m^3);

ρ_b – baridade do provete (kg/m^3);

V_m – porosidade (%);

VFB – percentagem de vazios na mistura de agregados preenchidos com betume (%).

No Quadro 4.16 apresentam-se os valores médios de porosidade, VMA e VFB dos provetes, para cada percentagem de betume. A totalidade dos valores determinados é apresentada no Quadro II.5 do apêndice II.

Quadro 4.16 – Porosidade, VMA e VFB dos provetes

Betume (%)	Porosidade (%)	VMA (%)	VFB (%)
6,0	5,2	18,48	71,73
6,5	3,0	17,38	82,87
7,0	1,9	17,55	89,11

Analisando os valores acima expostos observa-se que a porosidade diminui para quantidades mais elevadas de betume e que o VFB, volume de vazios preenchidos por betume, aumenta para quantidades mais elevadas de betume, tal como esperado. Por outro lado, o andamento do VMA com a percentagem de betume apresenta uma variação esperada.

4.5.2 Percentagem Ótima de Betume

A percentagem ótima de betume em misturas SMA é selecionada de modo a obter porosidades nos provetes Marshall entre 3% e 4% (Drüschner et al, 2000). Deste modo, atendendo ao gráfico da Figura 4.24 que representa a variação da porosidade, em função da percentagem de betume, elaborado através dos dados atrás determinados, pode observar-se que este intervalo de variação da porosidade fornece valores para a percentagem em betume entre 6 e 6,5 %.

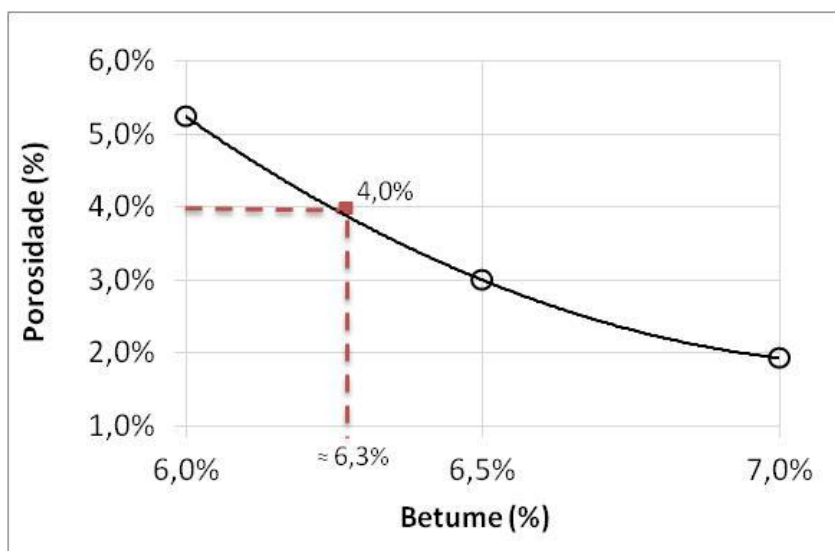


Figura 4.24 – Representação gráfica da variação da porosidade para cada percentagem de betume

Como valor de referência optou-se por considerar para a porosidade de formulação o valor de 4%, obtendo-se deste modo uma percentagem ótima de betume de aproximadamente 6,3%.

4.5.3 Ensaio para Avaliação do Escorrimento pelo Método de Schellenberg

A formulação da mistura SMA 12,5 em estudo requer que se realize a análise à drenagem do betume. Este ensaio destina-se a averiguar se a quantidade de fibras celulósicas na mistura é suficiente para evitar o escorrimento do betume. A drenagem do betume ocorre durante o armazenamento e/ou o transporte e pode levar a que partes da mistura fiquem com excesso de betume, o que pode levar ao aparecimento de patologias no pavimento (conforme já referido no subcapítulo 3.3.4). Para avaliar o escorrimento do betume foi realizado o ensaio de *Schellenberg*, por vezes também designado por método do copo, de acordo com o procedimento indicado na norma EN 12697-18.

O ensaio de *Schellenberg* iniciou-se após o fabrico da mistura betuminosa, com aproximadamente 1200g de massa, segundo a norma EN 12697-35. A percentagem de betume utilizada foi de 6,5% e a percentagem de fibras na mistura foi de cerca de 0,3%.

Posteriormente, a mistura foi colocada no interior de um recipiente de vidro cilíndrico, designado vulgarmente por “copo” (Figura 4.25), de massa conhecida e, de seguida, o conjunto foi colocado no interior da estufa a uma temperatura 25°C superior à utilizada na preparação da mistura, neste caso aproximadamente 150°C, durante um período de 60 minutos \pm 1 minuto.



Figura 4.25 – Recipiente de vidro utilizado no ensaio (esquerda) e mistura colocada no interior do recipiente para posterior colocação dentro de estufa (direita)

Segundo a norma EN 12697-18, o resultado do escoamento do betume numa mistura betuminosa, corresponde ao material que ficou retido no copo, após se virar o copo com a base para cima durante 10 segundos (Figura 4.26).



Figura 4.26 – Material retido no interior do copo

O resultado obtido para a mistura em estudo foi determinado através da expressão (4.9):

(4.9)

$$D = 100 \times \frac{(W3-W1-W4)}{(W2-W1)}$$

sendo,

D – percentagem de material escorrido no copo – “Drenagem máxima” (%);

W1 – valor da massa inicial do copo (%);

W2 – valor da massa inicial do copo com a massa da amostra de mistura betuminosa (g);

W3 – valor da massa inicial do copo com a massa de material retido no copo após virar o copo (g);

W4 – valor da massa do material seco retido no peneiro de malha quadrada de dimensão 1 mm (g).

$$D = 100 \times \frac{(221,71 - 220,94 - 0)}{(1376,60 - 220,94)} = 0,0666 \%$$

O valor obtido para a mistura SMA 12,5, em estudo, foi de aproximadamente 0,07% valor inferior ao máximo admissível de 0,3%. O que significa que a quantidade de fibras utilizada é a suficiente.

4.5.4 Propriedades Volumétricas da Mistura Formulada para 4% de Porosidade

Dos valores atrás determinados, nomeadamente a baridade, a porosidade, o VMA, e o VFB, é possível traçar os gráficos que se apresentam na Figura 4.27. Da sua observação é possível determinar as propriedades da mistura formulada para 4% de porosidade, que corresponde à percentagem ótima de betume de 6,3 %, como já se verificou no ponto 4.5.2. Os valores resultantes encontram-se apresentados no Quadro 4.17.

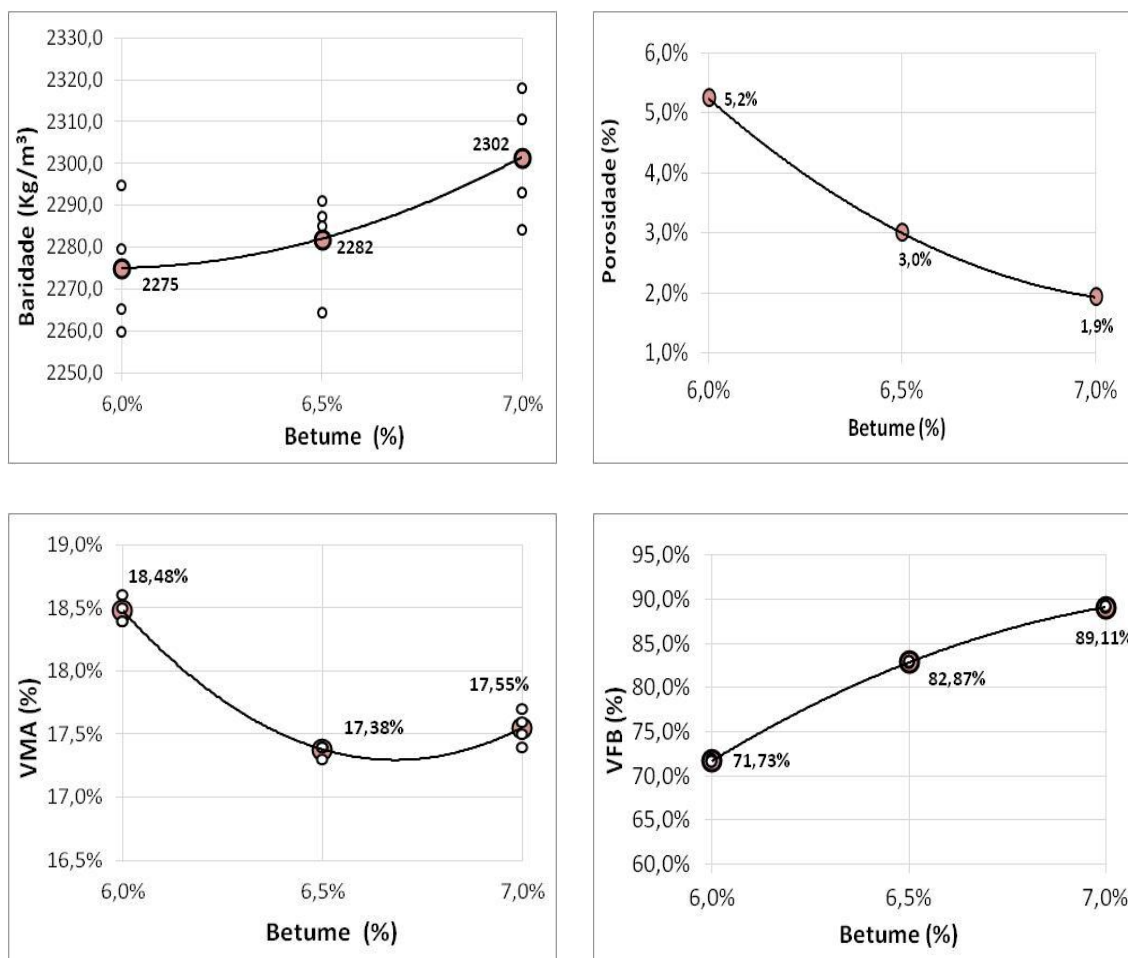


Figura 4.27 – Representação gráfica das propriedades volumétricas para as várias percentagens de betume

Quadro 4.17 – Propriedades volumétricas da mistura SMA 12,5, formulada para 4% de porosidade

Mistura	Porosidade (%)	Percentagem em betume (%)	Baridade (kg/m^3)	VMA (%)	VFB (%)
SMA 12,5	4,0	6,3	2278	17,7	79,0

4.6 Avaliação de Características Mecânicas

4.6.1 Ensaios de Compressão de Marshall

A realização do ensaio de compressão de Marshall foi adotada neste trabalho por ser, atualmente, o ensaio de caracterização de misturas betuminosas mais utilizado em Portugal, embora este ensaio não seja particularmente adaptado para a caracterização de misturas do tipo SMA. É frequente a obtenção de valores de estabilidade Marshall baixos, o que leva a considerar, erradamente, que estas misturas apresentam baixa resistência à deformação (Drüschner et al, 2000).

Os provetes cilíndricos da mistura em estudo foram ensaiados na prensa de Marshall determinando-se a sua estabilidade e deformação. Na realização deste ensaio foram seguidas as indicações definidas na norma EN 12697-34, apresentando-se de seguida as várias etapas da sua execução (Figura 4.28).



Figura 4.28 – Ensaio de compressão de Marshall

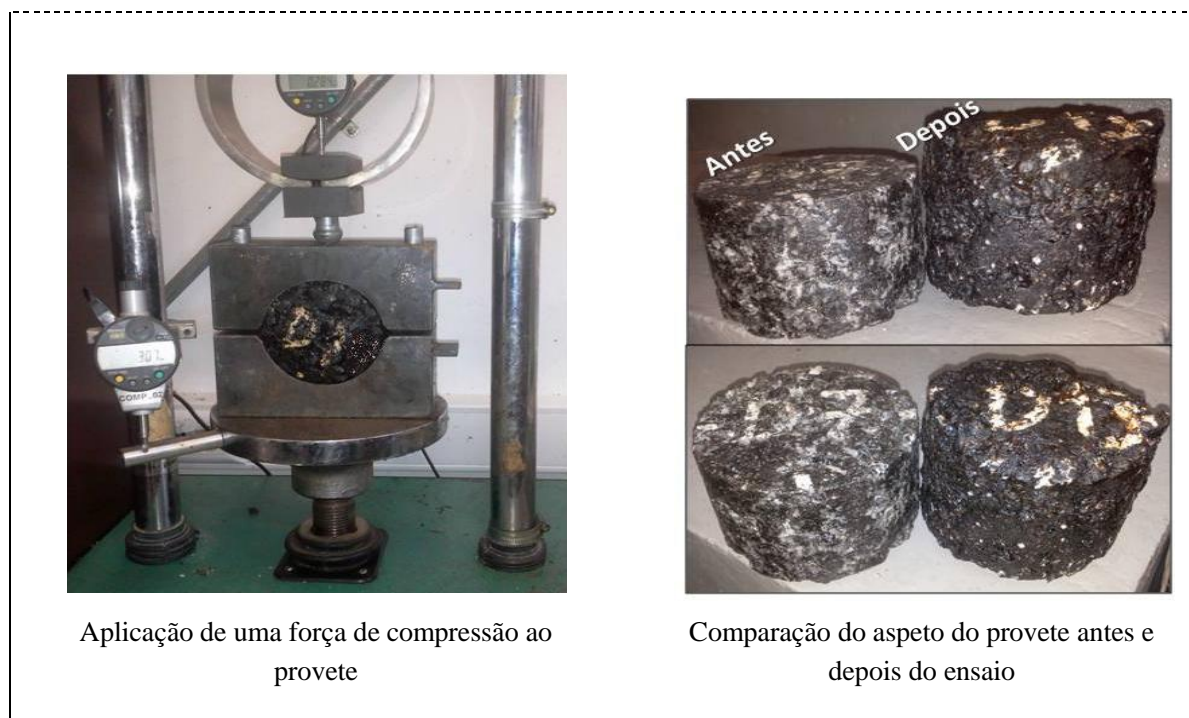


Figura 4.28 (Continuação) – Ensaio de compressão de Marshall

Os resultados obtidos nos ensaios de compressão Marshall são apresentados graficamente na Figura 4.29 e na forma tabelar no Quadro 4.18.

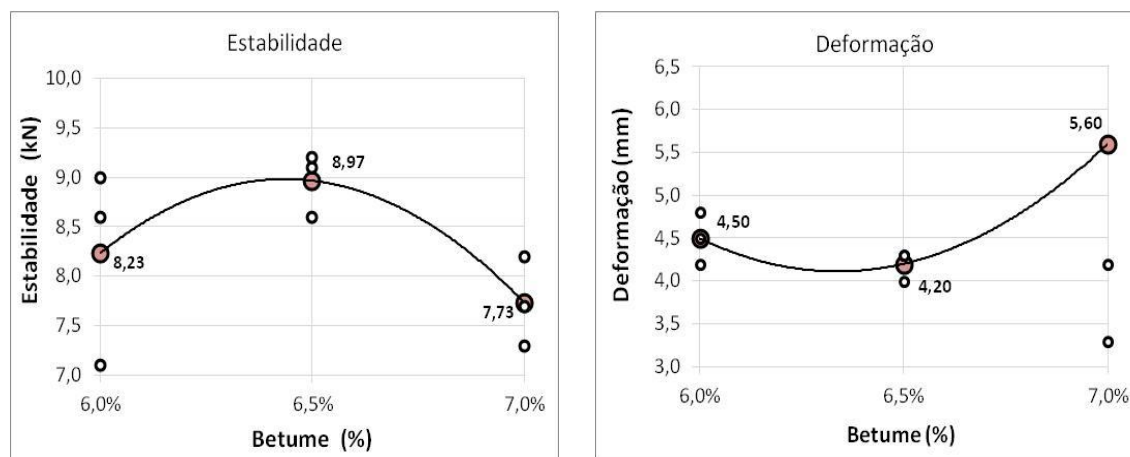


Figura 4.29 – Resultados obtidos nos ensaios de compressão Marshall

Os resultados médios obtidos para a estabilidade Marshall encontram-se entre 8 e 9 kN, valores correspondentes ao limiar inferior do intervalo geralmente definido como aceitável para misturas tradicionais. Por outro lado, os valores de deformação médios obtidos são de um modo geral mais elevados, comparativamente aos verificados em misturas tradicionais cujo intervalo de valores se situa entre 2 a 4 mm (EP, 2009; Gardete et al, 2011).

Quadro 4.18 – Resultados obtidos nos ensaios de Marshall para a mistura SMA 12,5, formulada para 4% de porosidade

Mistura	Percentagem em betume (%)	Estabilidade (kN)	Deformação (mm)	Quociente Marshall (kN/mm)
SMA 12,5	6,3	8,9	4,1	2,2

No Quadro II.6 do apêndice II são apresentados os resultados obtidos para todos os provetes ensaiados.

4.6.2 Avaliação da Sensibilidade à Água

A resistência das misturas betuminosas à ação da água é uma importante característica diretamente relacionada com o desempenho e a durabilidade deste tipo de materiais durante a vida útil dos pavimentos rodoviários e aeroportuários. Por esta razão, torna-se essencial uma avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas, geralmente estimada através da perda de resistência mecânica das misturas após condicionamento em água (InIR, 2009).

Neste estudo a avaliação da sensibilidade à água foi realizada de acordo com o método A da norma EN 12697-12, o qual assenta na comparação entre os valores médios das resistências à tração em compressão diametral, determinadas de acordo com a norma EN 12697-23, de dois grupos de provetes cilíndricos previamente acondicionados em condições distintas.

O primeiro grupo de provetes foi acondicionado ao ar a 25°C. O segundo grupo foi primeiramente submetido a vácuo em água, por forma a garantir que a água penetre de forma adequada nos interstícios dos provetes, sendo posteriormente acondicionados em banho de água a 40°C, por um período de 68 a 72 horas.

Concluído o período de acondicionamento, os provetes foram sujeitos a ensaios para determinar a resistência à tração indireta. É importante referir que na realização dos provetes utilizados foi apenas considerada a composição com a percentagem ótima de betume.

A partir dos valores médios das resistências à tração indireta dos provetes imersos (ITR_w) e “a seco” (ITR_d), a 25°C (temperatura de ensaio), é calculada a resistência conservada em tração indireta, $ITSR$, através da expressão (4.10) (InIR, 2009):

(4.10)

$$\text{ITSR} = 100 \times \frac{\text{ITS}_w}{\text{ITS}_d} (\%)$$

Na Figura 4.30 ilustra-se o procedimento do ensaio realizado.

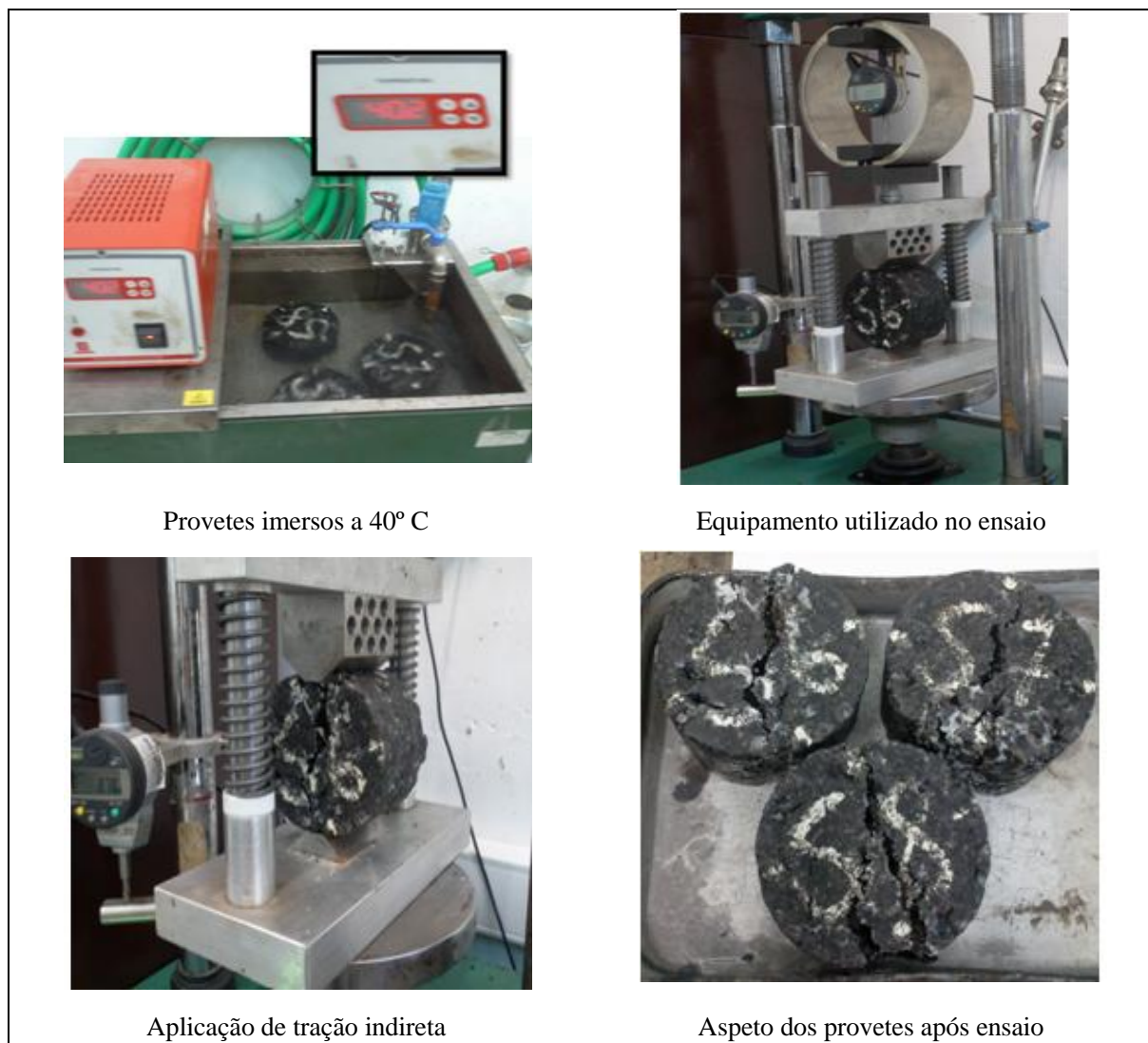


Figura 4.30 – Tração indireta de provetes para avaliação de sensibilidade à água

O parâmetro ITSR obtido foi de 88%, o que traduz um satisfatório comportamento em termos de sensibilidade à água.

No Quadro 4.19 apresentam-se as categorias de valores de ITSR definidas na Norma Europeia EN 13108-1, para as percentagens mínimas de ITSR relativas ao ensaio de avaliação da sensibilidade à água, de acordo com a Norma Europeia EN 12697-12. Da sua observação conclui-se que o ensaio de sensibilidade à água realizado cumpre o limite mínimo

preconizado para a segunda categoria mais exigente de Resistência Conservada em Tração Indireta, $ITSR_{80}$.

Quadro 4.19 – Definição das categorias de valores de $ITSR$ relativas ao ensaio de sensibilidade à água (EN 13108-1)

Limites Mínimos de $ITSR$ (%)	Categoria $ITSR$
90	$ITSR_{90}$
80	$ITSR_{80}$
70	$ITSR_{70}$
60	$ITSR_{60}$
Sem Requisitos	$ITSR_{NR}$

O estudo da mistura betuminosa e as características dos provetes Marshall apresentam-se nos Quadro II.7 e Quadro II.8 respetivamente, do apêndice II. Os resultados completos dos ensaios de sensibilidade à água encontram-se no Quadro II.9 do apêndice II e na secção III.2 do apêndice III.

4.6.3 Módulos de Rigidez Medidos em Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral

O ensaio de tração indireta em compressão diametral foi utilizado para a determinação dos módulos de rigidez dos vários provetes cilíndricos realizados em laboratório. Este ensaio foi realizado segundo a norma EN 12697-26 – Anexo C.

Os provetes foram submetidos a um carregamento repetido de compressão diametral, desenvolvendo um estado de tensão horizontal de tração uniforme ao longo do plano diametral de aplicação da carga. Este estado de tensão induz a deformação do provete (Figura 4.31 a). Durante o ensaio é registada a curva de deformação medida no provete, segundo a direção diametral perpendicular ao plano de atuação da carga, e a curva correspondente ao impulso da força (Neves et al, 2006). Estas curvas têm a forma que se representa na Figura 4.31 b).

As condições de ensaio adotadas são apresentadas no Quadro 4.20.

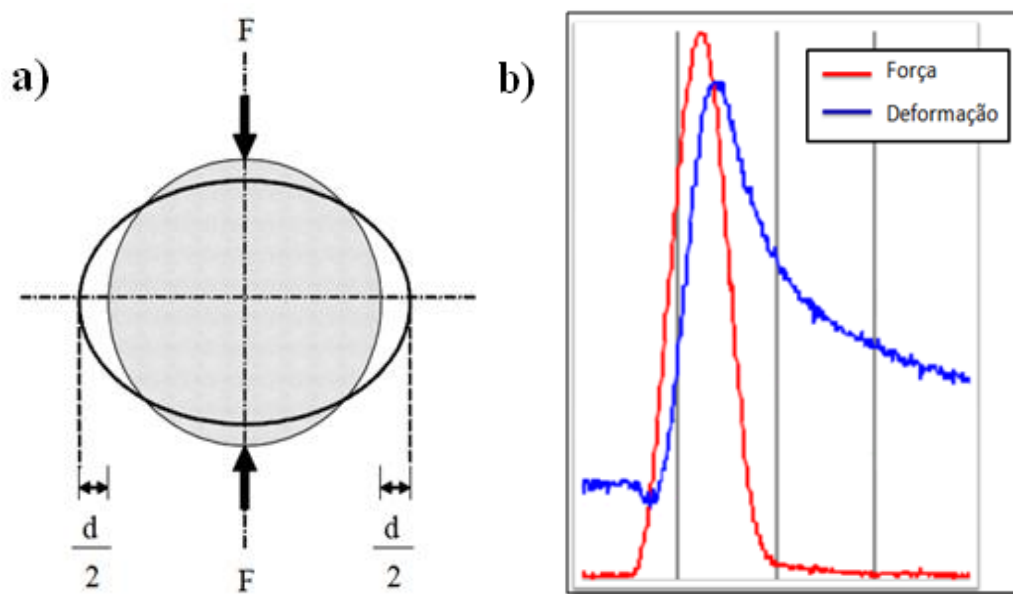


Figura 4.31 – Princípios verificados no ensaio de tração indireta por compressão diametral: a) Carregamento e deformação (Neves et al, 2006); b) curvas de força e deformação

Quadro 4.20 – Condições de ensaio

Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral	
Tempo de crescimento da carga (μ s)	124
Condicionamento (ciclos)	5
Temperatura ($^{\circ}$ C)	20
Amplitude da carga (N)	1250
Coefficiente de Poisson (ν)	0,35

Os valores de módulo de rigidez e deformação, para cada percentagem de betume, foram determinados através da média dos valores obtidos para cada provete, e encontram-se representados graficamente na Figura 4.32 e 4.33, respetivamente. É importante referir que os resultados dos provetes 3.1 e 4.1 não entraram no cálculo final do valor médio do módulo de rigidez e da deformação, pelo facto de apresentarem uma elevada diferença de valores, sendo considerados *outliers*.

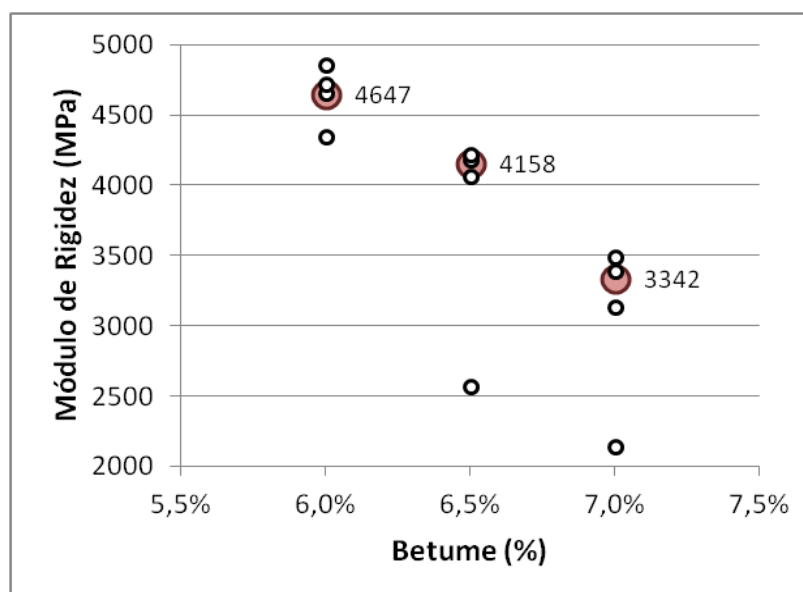


Figura 4.32 – Representação gráfica dos valores de módulo de rigidez obtidos a 20°C em função da percentagem de betume

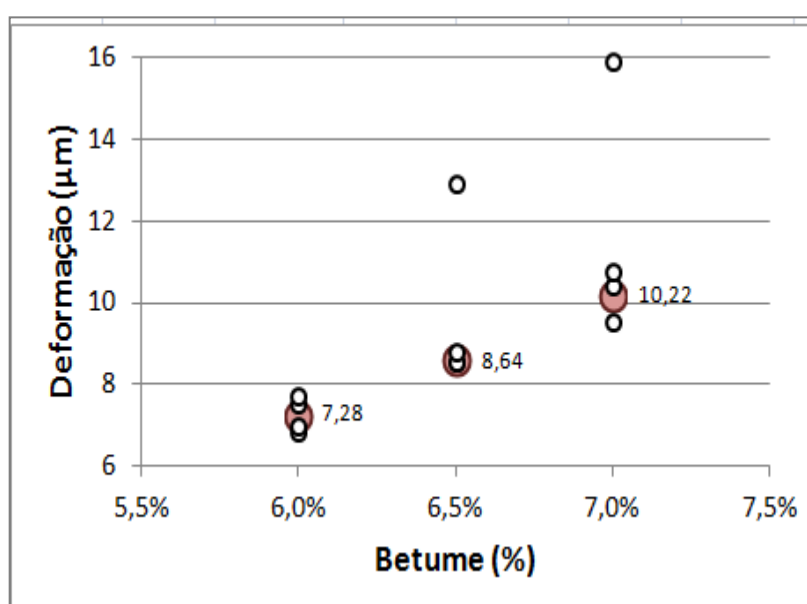


Figura 4.33 – Representação gráfica dos valores de deformação obtidos em função da percentagem de betume

Por observação dos gráficos acima apresentados, verifica-se que à medida que a percentagem de betume aumenta o módulo de rigidez diminui e consequentemente a deformação aumenta.

De seguida é efetuada uma comparação sucinta entre os valores de módulo de rigidez obtidos para a mistura em estudo e os observados em outros trabalhos, com o objetivo de melhor compreender o seu comportamento mecânico.

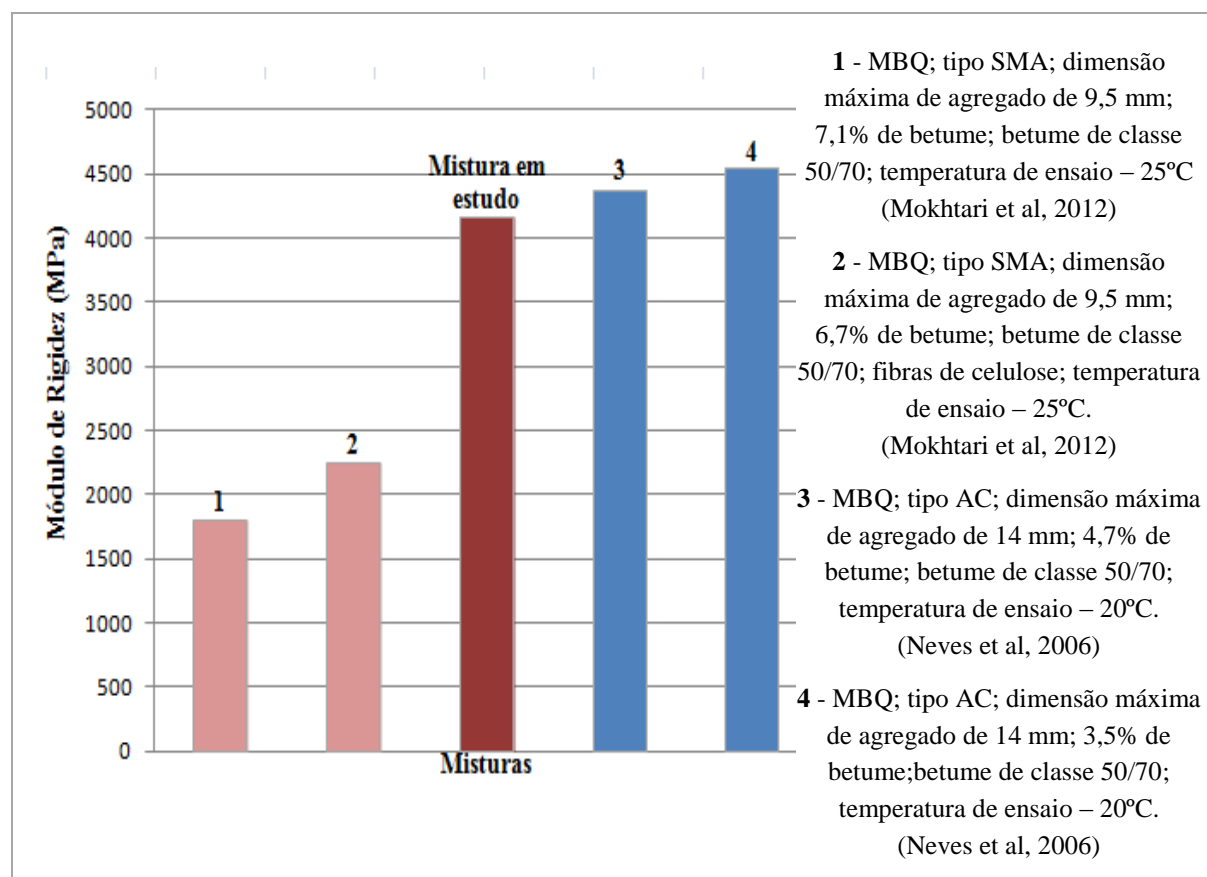


Figura 4.34 – Comparação de módulos de rigidez obtidos em ensaios de tração indireta por compressão diametral (Mokhtari et al, 2012; Neves et al, 2006)

Da observação do gráfico da Figura 4.34 pode concluir-se, de modo geral, que os valores de módulo de rigidez obtidos neste trabalho são bastante razoáveis. É também bastante visível a influencia que as altas percentagem de betume têm na diminuição dos valores de módulo de rigidez apresentados.

Os módulos de rigidez apresentados para as misturas tradicionais são superiores aos medidos para as misturas SMA. Este fator está diretamente ligado com o facto das misturas SMA apresentarem, normalmente, teores em ligante superiores ao das misturas tradicionais. Outros fatores que influenciam diretamente os valores de módulo de rigidez são a origem do agregado, o tipo de betume, a granulometria da mistura e as condições gerais do ensaio, entre outros.

4.6.4 Resistência à Deformação Permanente em Ensaios Wheel-Tracking

Os ensaios de determinação da resistência à deformação permanente foram realizados de acordo com a norma EN 12697-22 segundo o procedimento B (ao ar), e são vulgarmente designado por ensaios de wheel-tracking devido ao equipamento utilizado (Figura 4.35).



Figura 4.35 – Equipamento para determinar a resistência à deformação permanente – wheel-tracking (Martinho, 2013)

Este ensaio consiste na medição da profundidade da rodeira, RD_{air}, formada após sucessivas passagens de uma roda sobre o material betuminoso, permitindo avaliar a sua suscetibilidade para deformar.

Antes de iniciar o ensaio foi feito o condicionamento térmico das lajetas, em ar, dentro da câmara wheel-tracker durante um período mínimo de 6 h e um máximo de 24h, à temperatura de ensaio ($60 \pm 1^\circ\text{C}$). Esta temperatura foi definida de acordo com o que está estipulado na norma EN 13108-1.

O procedimento de ensaio consiste na aplicação de 10 000 ciclos de carga sobre as lajetas. O ensaio termina após este número de ciclos, ou quando atinge a profundidade de rodeira de 20 mm.

Foram ensaiadas seis lajetas, duas produzidas para cada percentagem de betume (6%, 6,5% e 7%). As características das lajetas realizadas, nomeadamente a massa ao ar, a baridade geométrica e a dimensão, encontram-se apresentadas no Quadro II.10 do apêndice II.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios wheel-tracking (Figura 4.36) calcularam-se a percentagem média de profundidade de rodeira, PRD_{AIR}, que é a percentagem da profundidade de rodeira para o material em teste em N ciclos (é o valor médio das duas amostras), e a taxa de deformação média, WTS_{AIR}, que é a taxa média de deformação do material em teste (é o valor médio das duas amostras, medido em $\text{mm}/10^3$ ciclos de carga), que estão apresentados no Quadro 4.21.

A taxa de deformação média, WTS_{AIR} , foi calculada para cada amostra, através da expressão (4.11).

(4.11)

$$WTS_{AIR} = \frac{(d_{10\,000} - d_{5\,000})}{5}$$

onde:

WTS_{AIR} – profundidade da rodeira (mm/ 10^3 ciclos de carga);

$d_{5\,000}$, $d_{10\,000}$ – profundidade de rodeira após 5 000 e 10 000 ciclos (mm)

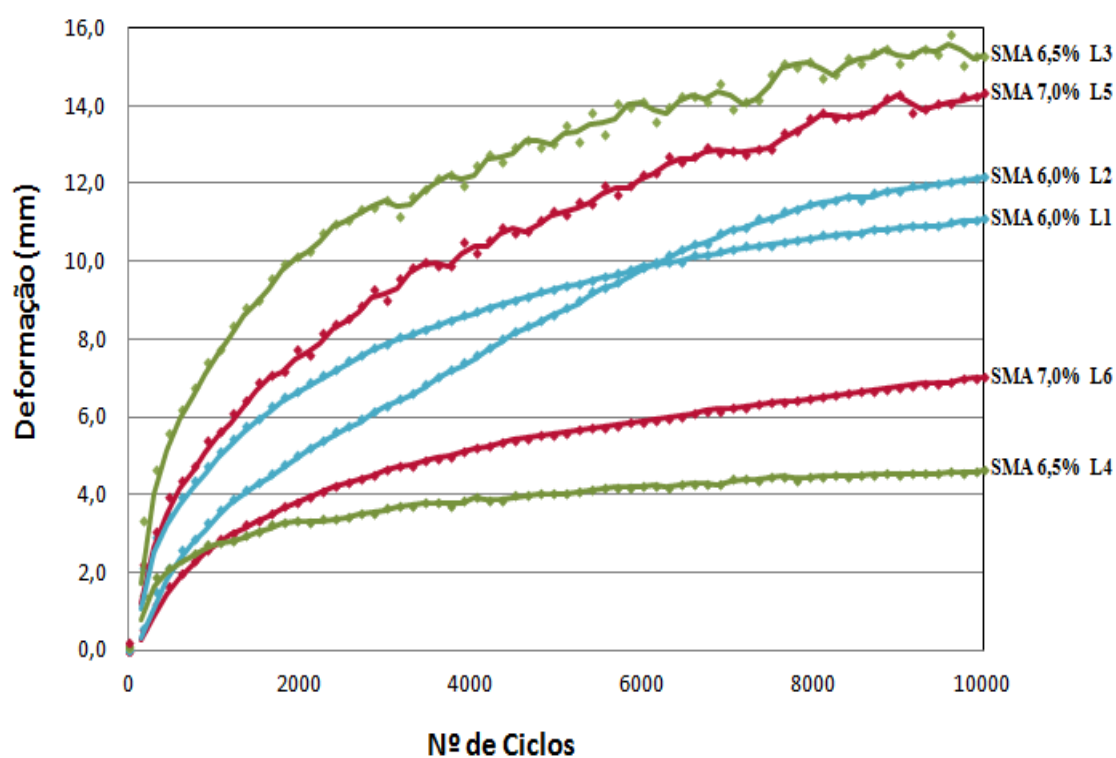


Figura 4.36 – Gráfico de resultados, RD_{AIR} , dos ensaios de Wheel-Tracking realizados a 60°C.

Quadro 4.21 – Valores de profundidade de rodeira (PRD_{AIR}) e de taxa média de deformação ao ar (WTS_{AIR})

Lajeta	Pb (%)	RD_{AIR} (mm)	PRD_{AIR} (%)	WTS_{AIR} (mm/10 ³ ciclos)
SMA 6,0 L1	6,0	11,1	26,40	0,360
SMA 6,0 L2	6,0	12,2	28,30	0,704
SMA 6,5 L3	6,5	15,3	37,29	0,446
SMA 6,5 L4	6,5	4,6	11,00	0,118
SMA 7,0 L5	7,0	14,3	32,57	0,608
SMA 7,0 L6	7,0	7,0	16,37	0,292

Da observação do gráfico de resultados, RD_{AIR} , apresentado na Figura 4.36, verifica-se a existência de uma discordância nos valores de deformação, para lajetas com a mesma percentagem de betume, nomeadamente nas lajetas com 6,5% e 7,0%. Deste modo, verificou-se que seria necessária a realização de um maior número de lajetas para cada percentagem de betume, aumentando a amostra de resultados e para possibilitar a observação de uma tendência. Como tal não foi possível, optou-se por comparar os resultados obtidos nos ensaios de wheel-tracking com valores médios resultantes de outros ensaios de desempenho à deformação permanente, nomeadamente ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas, com o objetivo de melhor compreender o comportamento deste tipo de mistura, à deformação permanente.

Na Figura 4.37 apresentam-se os valores médios da extensão final medidos para cada percentagem de betume, obtidos em ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas, realizados no âmbito de outro trabalho de dissertação em curso, para a mesma mistura betuminosa.

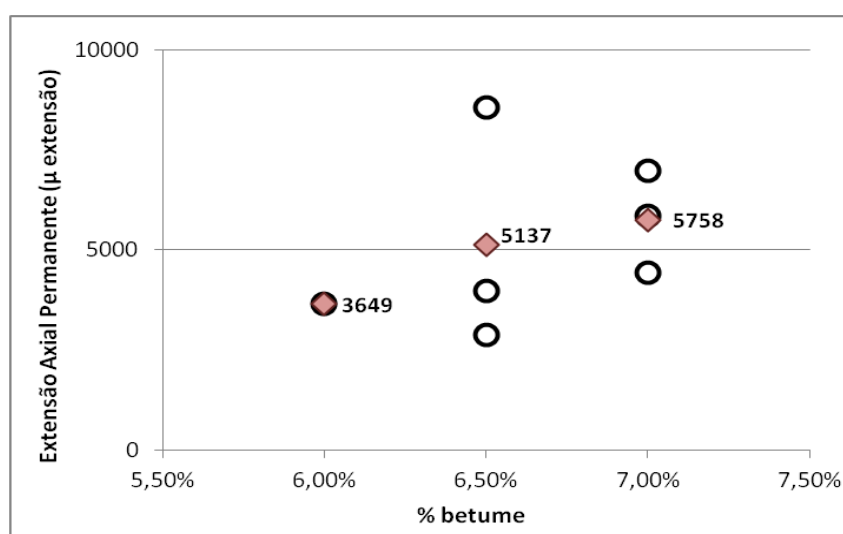


Figura 4.37 – Variação da extensão axial permanente acumulada com a percentagem de betume (Ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas)

Pela observação do gráfico da Figura 4.37, verifica-se que o valor médio de deformação tende a aumentar com o aumento da percentagem de betume, seguindo a seriação esperada, isto é, maiores percentagens de betume correspondem a menores resistências à deformação permanente (Gardete, 2006). Por forma avaliar a coerência dos resultados apresentados e, de modo geral, o comportamentos de misturas SMA à deformação permanente, apresenta-se, de seguida, uma comparação entre o valores da extensão apresentados na Figura 4.38, nomeadamente o correspondente à percentagem de 6.0% de betume, e os divulgados em outros trabalhos.

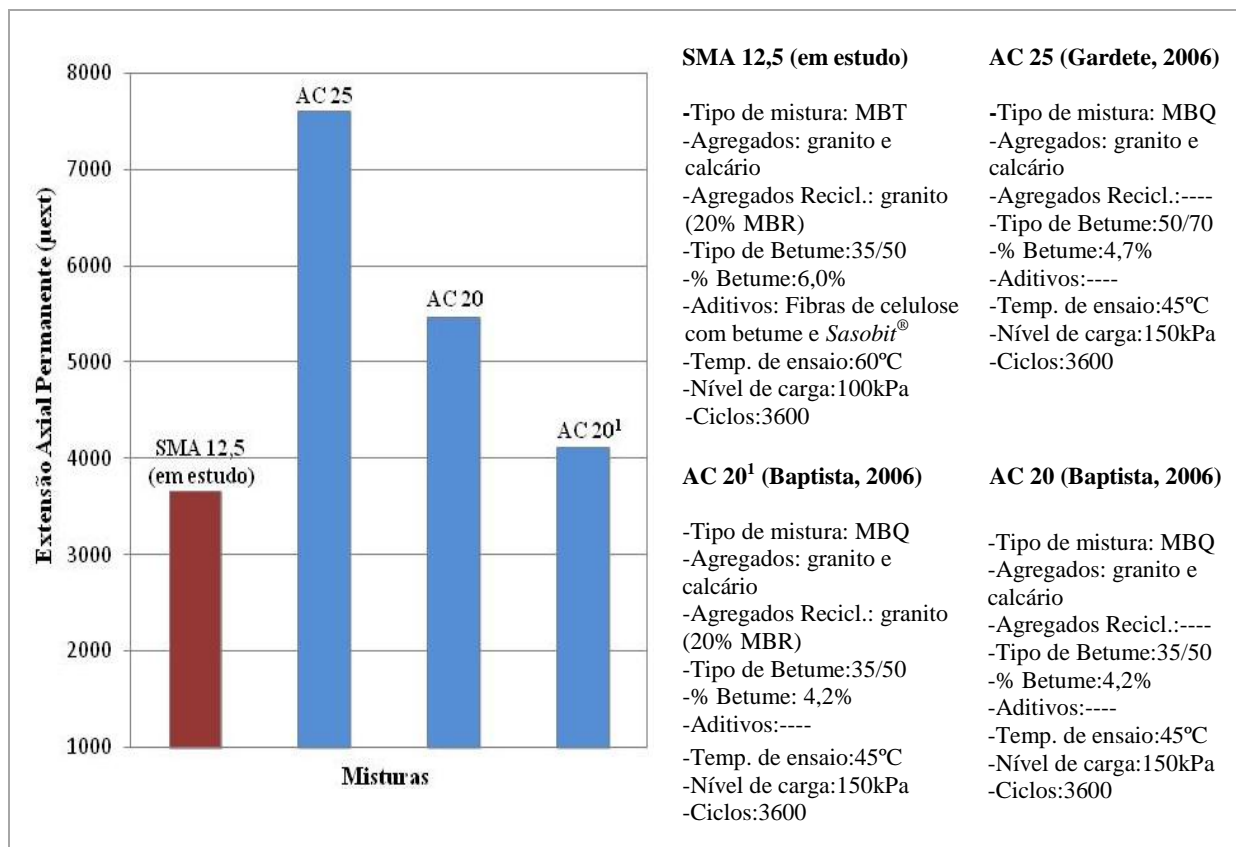


Figura 4.38 – Comparação do valor médio da extensão axial permanente medido em ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas com os apresentados por outras misturas (Gardete, 2006; Baptista, 2006)

De modo geral, da observação da Figura 4.38, pode concluir-se que as misturas SMA apresentam um comportamento à deformação permanente superior ao das misturas tradicionais.

Esta comparação permite ter alguma noção acerca do desempenho à deformação permanente da mistura em estudo, embora a comparação seja difícil devido às condições de ensaio diferirem de mistura para mistura, o mesmo acontecendo com outros parâmetros, tais como o

tipo/quantidade de betume, os agregados e a temperatura de produção e compactação. Todos estes fatores poderão influenciar os valores de extensão axial permanente.

Tendo em conta os resultados insatisfatórios obtidos nos ensaios wheel-tracking, conforme observado na Figura 4.36, optou-se por desprezar para cada percentagem de betume o valor de deformação da lajeta que menos se enquadra na tendência verificada para os ensaios de compressão uniaxial, obtendo-se o gráfico apresentado na Figura 4.39. Ainda assim, verifica-se que o valor de deformação para a percentagem de 6,5 % é superior ao esperado, por comparação com o valor obtido para a lajeta com 7% de betume.

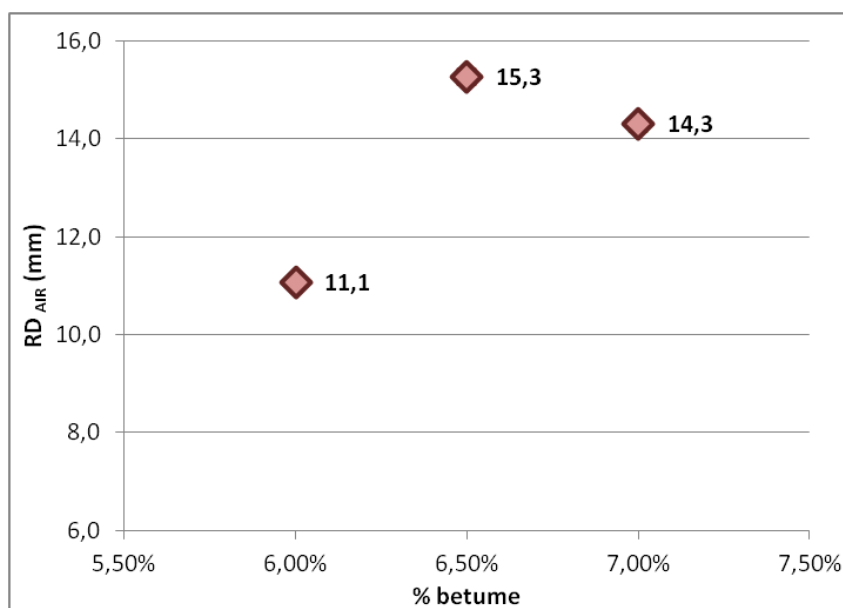


Figura 4.39 – Variação da média da profundidade de cavado de rodeira com a percentagem de betume (Ensaio de wheel-tracking)

De seguida, são comparados alguns dos parâmetros obtidos nos ensaios wheel-tracking com os determinados em ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas como forma de avaliar a existência de uma correlação satisfatória entre os resultados de ambos os ensaios.

Os dois parâmetros considerados de referência, em ensaios de wheel-tracking para a caracterização à deformação permanente de misturas betuminosas são a deformação, RD_{AIR} , e a taxa de deformação média, WTS_{AIR} . Em correspondência com estes parâmetros, para o ensaio de compressão uniaxial de cargas repetidas, tem-se a extensão axial permanente acumulada, ϵ_{3600} , e a velocidade de deformação f (Gardete, 2006). As relações entre estes parâmetros encontram-se nas Figuras 4.40 e 4.41. Os valores dos coeficientes de determinação apresentados foram obtidos para regressões lineares entre os resultados.

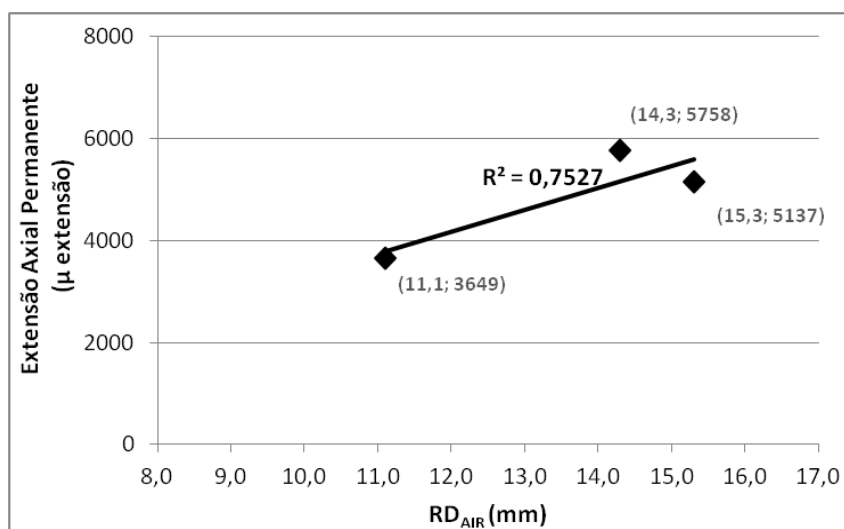


Figura 4.40 – Relação entre a deformação do ensaio de wheel-tracking, RD_{AIR} , e a extensão axial permanente acumulada média do ensaio de compressão uniaxial cíclico, ϵ_{3600}

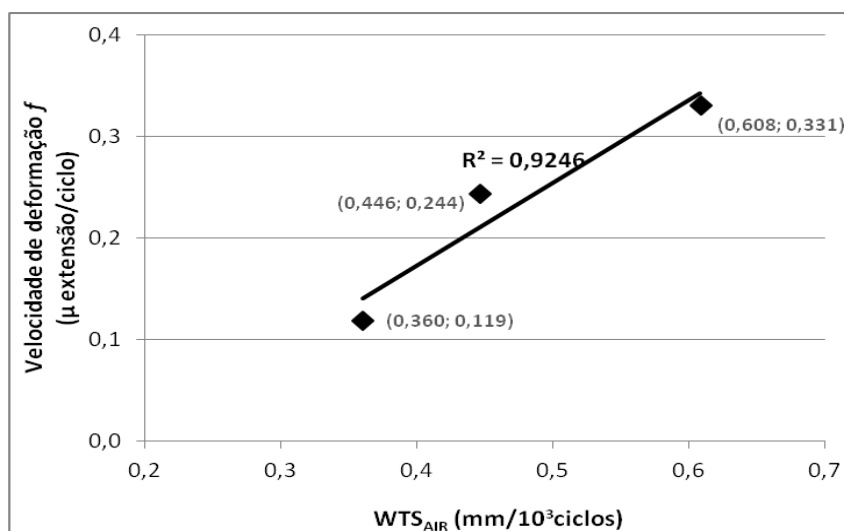


Figura 4.41 – Relação entre a taxa de deformação do ensaio de wheel-tracking, WTS_{AIR} , e a velocidade de deformação média do ensaio de compressão uniaxial cíclico, f

Pela análise dos gráficos acima apresentados pode observar-se que a deformação, RD_{AIR} , e a taxa de deformação, WTS_{AIR} , obtidas no ensaio de wheel-tracking, apresentam correlações satisfatórias com os parâmetros análogos do ensaio de compressão uniaxial cíclico, confirmando a tendência esperada.

O aspeto de algumas das lajetas, após ensaio, pode ser observado na Figura 4.42.

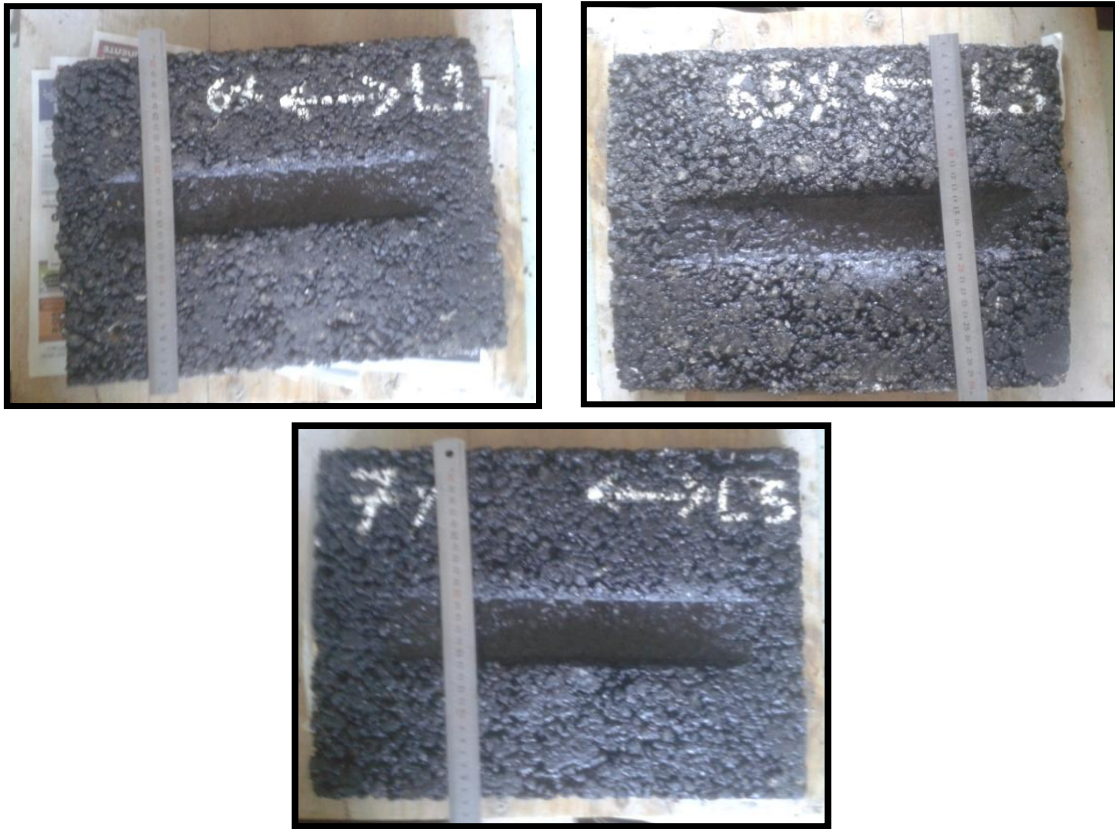


Figura 4.42 – Aspeto das lajetas após ensaios de wheel-tracking

4.7 Comparação das Características da Mistura de Estudo com as Obtidas em Estudos Similares e Especificações Existentes

Neste subcapítulo é feita uma comparação das características da mistura de estudo, determinadas através de alguns trabalhos experimentais, com as divulgadas em diversas referências bibliográficas assinaladas.

4.7.1 Propriedades Volumétricas

➤ Comparação das Propriedades Volumétricas da Mistura de Estudo com Valores Definidos em Especificações Existentes para Misturas SMA a Quente

No Quadro 4.22 apresenta-se a comparação de algumas características obtidas na mistura em estudo com valores definidos em algumas especificações consideradas de referência, nomeadamente, a ZTV-Asphalt StB 2001 (Drüschner et al, 2000), a AASHTO MP8 (Prowell et al, 2009), a DER-ST ET-DE-P00/031 (DER-ST, 2007) e o Proyecto SMA (Proyecto SMA, 2014). Da sua observação, pode concluir-se que as propriedades volumétricas da mistura SMA 12,5 formulada enquadram-se na maioria dos valores definidos nas especificações apresentadas.

Quadro 4.22 – Comparação das propriedades volumétricas obtidas com valores definidos em especificações

Especificações Propriedades	Limites para o SMA 0/11S definidos na ZTV-Asphalt StB 2001	Limites definidos na AASHTO MP8	Limites definidos na DER-ST ET-DE-P00/031	Limites definidos no Proyecto SMA 11 2014	Valores obtidos para a mistura em estudo
Percentagem em betume (%)	≥ 6,5	≥ 6,0	----	≥ 5,8	6,3
Percentagem de aditivo (%)	0,3 – 1,5	≥ 0,3**	0,3 – 1,5****	0,3 – 1,0	0,38
Porosidade * (%)	3,0 – 4,0	4,0***	4,0	4,0 – 6,0	4,0
VMA (%)	----	≥ 17,0	≥ 17,0	≥ 17,0	17,7
VFB (%)	----	----	----	≤ 83	79,0
Drenagem máxima (%)	----	0,3	0,3	0,3	0,07

* - Em provetes Marshall compactados com 50 pancadas/face

** - No caso de fibras minerais é recomendado um mínimo de 0,4%

*** - Em estradas com tráfego leve pode utilizar-se 3% porosidade

**** - O aditivo referido é explicitamente fibras celulósicas

➤ **Comparação das Propriedades Volumétricas da Mistura de Estudo com as Divulgadas em Trabalhos Publicados para SMA Fabricadas a Quente, com Agregados Virgens**

No Quadro 4.23 apresenta-se a comparação de algumas propriedades volumétricas obtidas na mistura em estudo com as coligidas de trabalhos similares.

Quadro 4.23 – Comparação das propriedades volumétricas da mistura em estudo com as obtidas em misturas similares

Misturas Propriedades	(Gardete et al, 2011)	(Silva et al, 2008)	(Cao et al, 2013)	Valores obtidos para a mistura em estudo
Tipo de Mistura	MBQ	MBQ	MBQ	Temp.
Camada	SMA 12,5 (Desgaste)	SMA 11 (Desgaste)	SMA 13,2 (Desgaste)	SMA 12,5 (Desgaste)
Tipo de Betume	35/50	35/50	35/50	35/50
Agregados Naturais	Granito e Calcário	Granito e calcário	Basalto e calcário	Granito e calcário
Agregados Reciclados	----	----	----	Granito (MBR)
Aditivos	Fibras celulósicas - <i>Viatop</i> [®]	Fibras acrílicas	----	Fibras de celulose com betume e <i>Sasobit</i>[®] - <i>Viatop CT 40</i>[®]
Propriedades Volumétricas				
Percentagem em betume (%)	6,5	6,5	5,9	6,3
Baridade (kg/m ³)	2286,9	----	----	2277,8
Porosidade (%)	4,0	4,2	3,6	4,0
VMA (%)	18,3	17,0	17,5	17,7
VFB (%)	78,0	----	79,3	79,0

Analisando as propriedades volumétricas obtidas e as divulgadas em outros trabalhos, pode concluir-se que:

- Os valores obtidos para a mistura em estudo são bastante semelhantes aos divulgados em (Gardete et al, 2011), (Silva et al, 2008) e (Cao et al, 2012);
- O facto da mistura em estudo ser temperada e incorporar MBR não acarreta diferenças significativas, do ponto de vista das propriedades volumétricas, comparativamente às misturas SMA apresentadas, o que representa uma mais-valia do ponto de vista ambiental e económico;
- As propriedades volumétricas apresentadas em ambas as misturas, enquadram-se na maioria dos valores definidos nas especificações consideradas de referência, apresentadas no Quadro 4.22;

- Do ponto de vista volumétrico a mistura em estudo apresenta valores dentro do geralmente esperado para misturas SMA.

4.7.2 Características Mecânicas

Relativamente à caracterização mecânica de misturas do tipo SMA, pelo facto de ser um assunto ainda em desenvolvimento, verifica-se uma forte carência a nível bibliográfico de valores ditos de referência. Deste modo, sempre que possível, será feita referência aos valores definidos em especificações para misturas do tipo AC 14 surf (BB), bem como aos obtidos em trabalhos publicados, permitindo mais facilmente uma avaliação dos resultados obtidos na mistura SMA 12,5 em estudo.

➤ Comparação das Características Mecânicas da Mistura de Estudo com Valores Definidos em Especificações Existentes e Trabalhos Publicados para Misturas AC 14 surf (BB)

No Quadro 4.24 apresentam-se os valores definidos no caderno de encargos da EP (EP, 2009) e os apresentados em Silva et al, (2008), referentes às características mecânicas de misturas do tipo AC 14 surf (BB).

Quadro 4.24 – Comparação das características mecânicas obtidas com valores definidos em especificações e trabalhos publicados para mistura AC 14 surf (BB)

Misturas Propriedades	(EP, 2009) AC 14 surf (BB)	(Silva et al, 2008) AC 14 surf (BB)	(Toraldó et al, 2013) AC 14 surf (BB)	(Toraldó et al, 2013) AC 14 surf (BB)	Valores obtidos para a mistura em estudo
Tipo de Mistura	MBQ	MBQ	MBQ	MBT	Temp.
Camada	AC14 surf	AC14 surf	AC14 surf	AC14 surf	SMA 12,5 (Desgaste)
Tipo de Betume	----	35/50	50/70	50/70	35/50
Agregados Naturais	----	Granito e calcário	----	----	Granito e calcário
Agregados Reciclados	----	----	----	----	Granito (MBR)
Aditivos	----	----	Aditivo orgânico – Cera	----	Fibras celulósicas com betume e Sasobit® - Viatop CT 40®
Características Mecânicas					
Percent. em betume (%)	≥ 4,0	5,3	----	----	6,3
Estabilidade Marshall (kN)	7,5 – 15	12,5	----	----	8,8
Def. Marshall (mm)	2 – 4	2,8	----	----	4,2
RD _{AIR} (mm) (60°C)	----	0,99**	1,20	3,90	15,3*
WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos) (60°C)	----	0,42**	0,06	0,33	0,446*

* -Valor referente à percentagem de 6,5 % betume

** -Ensaio realizado a 45°C

Analisando as características mecânicas obtidas com as divulgadas em Silva et al (2008), Toraldo et al (2013) e em EP (2009), pode concluir-se o seguinte:

- O valor de estabilidade obtido, através de ensaios de Marshall, embora cumpra o intervalo recomendado em EP (2009), para misturas AC 14 surf (BB), é relativamente baixo, podendo-se considerar-se erradamente que as misturas do tipo SMA apresentam uma resistência à deformação inferior à verificada nas misturas tradicionais (Gardete, 2011);
- O valor de deformação obtido, através de ensaios de Marshall, é próximo do limite superior do intervalo recomendado em EP (2009) e superior ao verificado em Silva et al (2008), para misturas AC 14 surf (BB), demonstrando que a formulação Marshall corrente não se adapta às mistura SMA, tal como já referido ao longo deste trabalho;
- O valor de profundidade de rodeira, RD_{AIR} , obtido através de ensaios de wheel-tracking é muito elevado comparativamente ao apresentado em Silva et al (2008) e em Toraldo et al (2013) contrariando o esperado, pelo facto das misturas do tipo SMA serem em geral caracterizadas pelo seu elevado desempenho à deformação permanente (Martinho, 2013 a);
- Numa primeira observação, pode concluir-se que o facto das misturas serem temperadas poderá influenciar negativamente o valor de RD_{AIR} . Tal facto é evidenciado pela comparação direta do valor de RD_{AIR} apresentado pela MBQ com o valor de RD_{AIR} apresentado pela MBT ambos divulgados em Toraldo et al (2013);
- O valor WTS_{AIR} obtido apresenta uma ordem de grandeza próxima do publicado em Silva et al (2008) e em Toraldo et al (2013) para MBT.

➤ **Comparação das Características Mecânicas da Mistura de Estudo com as Divulgadas em Trabalhos Publicados para SMA Fabricadas a Quente, com Agregados Virgens**

No Quadro 4.25 apresenta-se a comparação das características mecânicas obtidas com valores publicados para mistura similares.

Quadro 4.25 – Comparação das características mecânicas da mistura em estudo com as obtidas em misturas similares

Misturas	(Gardete et al, 2011)	(Silva et al, 2008)	Valores obtidos para a mistura em estudo
Propriedades			
Tipo de Mistura	MBQ	MBQ	Temp.
Camada	SMA 12,5 (Desgaste)	SMA 11 (Desgaste)	SMA 12,5 (Desgaste)
Tipo de Betume	35/50	35/50	35/50
Agregados Naturais	Granito e calcário	Granito e calcário	Granito e calcário
Agregados Reciclados	----	----	Granito (MBR)
Aditivos	Fibras celulósicas - <i>Viatop</i> [®]	Fibras acrílicas	Fibras celulósicas com betume e <i>Sasobit</i> [®] - <i>Viatop CT 40</i> [®]
Características Mecânicas			
Porcentagem em betume (%)	6,5	6,5	6,3
Estabilidade Marshall (kN)	7,8	11,8	8,8
Deformação Marshall (mm)	3,3	4,5	4,2
RD _{AIR} (mm) (60°C)	8,0***	1,51**	15,3*
WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos) (60°C)	0,418***	0,45**	0,446*

* - Valor referente à percentagem de 6,5 % betume

** - Ensaio realizado a 45°C

*** - Valor proveniente de ensaios realizados no âmbito de uma tese de doutoramento ainda em curso (resultado não publicado)

Comparando as características mecânicas obtidas com as divulgadas em outros trabalhos similares consultados, pode concluir-se o seguinte:

- No caso da estabilidade de Marshall o valor obtido é relativamente próximo do divulgado em Gardete et al (2011) e inferior ao apresentado em Silva et al (2008);
- No que respeita ao valor de deformação Marshall obtido, verifica-se que este é muito semelhante ao divulgado em Gardete et al (2011) e em Silva et al (2008), demonstrando alguma coerência nos resultados obtidos;
- O valor de deformação, RD_{AIR}, obtido é bastante elevado, quando comparado com os valores apresentados nos trabalhos similares, o que pode ser explicado de certa

forma por variabilidade das condições de fabrico da mistura e compactação das lajetas, ou por variações na granulometria da MBR introduzida na mistura. Estas eventuais variações associadas à incorporação de 20% de MBR, a qual apresentava uma granulometria muito contínua, pode ter levado a variações no esqueleto pétreo da mistura em estudo;

- O valor WTS_{AIR} obtido é bastante semelhante aos valores apresentados para misturas similares, comprovando de certa forma alguma coerência no comportamento desta mistura ao longo dos ensaios.

4.8 Considerações Finais

Os trabalhos experimentais realizados e descritos ao longo deste capítulo podem ser divididos em três etapas distintas: trabalhos de caracterização dos materiais utilizados, nomeadamente da MBR, trabalhos de avaliação das propriedades volumétricas, e trabalhos de avaliação das características mecânicas.

Da análise dos resultados obtidos nas etapas referidas, pode concluir-se que, de um modo geral, em termos de caracterização volumétrica a mistura em estudo cumpre as especificações existentes para misturas SMA similares. Relativamente à caracterização mecânica os resultados obtidos nos ensaios de wheel-tracking foram algo inconclusivos apresentando bastante dispersão de valores e contrariando os resultados indicados na bibliografia para misturas SMA. Além disso, em termos de sensibilidade à água a mistura estudada apresentou, de modo geral, um bom desempenho.

Quanto aos módulos de rigidez, avaliados à temperatura de 20°C através de ensaios de tração indireta por compressão diametral, verificou-se que os resultados obtidos são bastante satisfatórios.

Os ensaios realizados ao longo do presente trabalho não são suficientes para evidenciar a aptidão desta mistura como uma substituta às misturas tradicionais. No entanto, alguns dos resultados positivos a que se chegou podem representar um incentivo ao estudo e valorização deste tipo de misturas.

5 CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Síntese do Trabalho e Conclusões Gerais

As Misturas Betuminosas Temperadas (MBT) compreendem um grande número de misturas betuminosas, podendo ser fabricadas e aplicadas misturas densas, descontínuas (do tipo SMA) ou abertas, e com incorporação, ou não, de subprodutos industriais, nomeadamente Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR), constituindo uma possível alternativa às MBQ tradicionais.

Este trabalho pretende contribuir para a caracterização de uma mistura temperada, do tipo SMA, com incorporação de MBR e fibras celulósicas, procurando, inicialmente, conhecer o que tem sido feito na área das MBT e, simultaneamente na área das misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), desenvolvendo-se nos primeiros capítulos, uma revisão bibliográfica destas duas temáticas, de modo a mostrar a sua evolução e as questões que continuam ainda em aberto, pelo facto de serem temas ainda em desenvolvimento.

Para além disso, procurou-se evoluir um pouco no estudo da utilização de Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR) em novas misturas, pelo facto de proporcionar diversas vantagens a nível económico e ambiental. Este subproduto já foi incorporado em Misturas Betuminosas fabricadas a Quente (MBQ), mas as quantidades utilizadas em camadas de desgaste ainda não têm uma expressão significativa, pelo menos em Portugal, pelo que se considerou de interesse a sua utilização em MBT.

São várias as conclusões retiradas, a partir dos trabalhos de pesquisa realizados, no âmbito das MBT, destacando-se (Martinho et al, 2013 b; Capitão et al, 2012; Prowell et al, 2011; EAPA, 2010; Ferreira, 2009; Alves, 2012; Barbosa, 2012):

- As MBT podem ser produzidas com agregados naturais ou reciclados, e podem ser espalhadas e compactadas recorrendo às tecnologias tradicionais;
- A redução da temperatura pode ser conseguida através do uso de uma larga gama de aditivos disponíveis (aditivos orgânicos, aditivos químicos, ou mistos), ou através de técnicas de formação de espuma de betume;
- São geralmente produzidas com os mesmos equipamentos utilizados no fabrico de MBQ, em especial quando a redução da temperatura é conseguida pela introdução de aditivos sólidos, ou líquidos;

- As MBT apresentam um número significativo de benefícios, em comparação com as MBQ, associados essencialmente à economia de energia, o que conduz a uma redução significativa das emissões de gases de efeito de estufa e poluentes;
- São apontadas também algumas desvantagens, como por exemplo, os custos dos aditivos, a possível redução na resistência à deformação permanente e as dúvidas sobre a sua durabilidade. Estas desvantagens poderão ser eventualmente compensadas pelos benefícios que as MBT apresentam.

Por outro lado, de acordo com vários autores, pode concluir-se que a incorporação de MBR no fabrico de MBT acarreta diversas vantagens diretas, que vão desde a redução do consumo e do custo de matérias-primas naturais, passando pela diminuição do volume de resíduos a levar a vazadouro e por uma redução na energia utilizada na produção e aquecimento dos agregados, que conduzem a uma redução da poluição e do passivo ambiental.

Na sequência dos trabalhos de pesquisa realizados, retiraram-se as seguintes conclusões acerca das misturas do tipo SMA:

- As suas características principais são um esqueleto mineral descontínuo com elevado atrito interno, uma elevada percentagem de betume e um entrançado de fibras que permite evitar o escorrimento e/ou exsudação do ligante, favorecendo o revestimento dos agregados;
- No processo de fabrico, estas misturas não requerem equipamento especial, exceto quando se queira ter um doseador automático para a adição de fibras, nem recomendações especiais, a não ser o tempo de mistura suficiente para garantir a perfeita homogeneidade da mesma;
- As misturas do tipo SMA, não requerem equipamento especial no seu espalhamento, nem na sua compactação;
- Estas misturas apresentam um bom desempenho mecânico e oferecem boas características funcionais, quando aplicadas em camadas de desgaste, apresentam também uma vida útil superior à das misturas do tipo AC (betão betuminoso);
- O maior custo inicial destas misturas (cerca de 15 a 25%) é compensado pelo seu menor custo no ciclo de vida (cerca de 30 a 40%), devido à sua maior durabilidade.

Antes de dar início aos trabalhos experimentais foi necessário realizar um estudo sobre a mistura de agregados pretendida, tendo sempre como referência a norma europeia EN 13108-5 que contém princípios orientadores para misturas do tipo SMA, definindo 4 pontos de controlo que permitem definir a curva granulométrica da mistura. Estes pontos demonstram ser insuficientes para garantir a obtenção de uma granulometria suficientemente descontínua. Deste modo, torna-se fundamental a inclusão de anexos nacionais que possam complementar os pontos de controlo definidos na norma europeia, principalmente em países com pouca experiência na utilização de misturas do tipo SMA, como Portugal.

Pelo facto da granulometria do agregado da MBR ser muito densa, foi necessário proceder-se à separação da MBR em duas frações, uma grossa e outra fina, com o intuito de obter uma granulometria mais descontínua na mistura final.

De seguida, evoluiu-se para a realização dos trabalhos experimentais, com o objetivo de melhor compreender o comportamento desta mistura inovadora, que reúne a tecnologia de produção de MBT, com a granulometria de uma SMA e a introdução de MBR.

Tendo presente este objetivo, avançou-se para uma primeira fase dos trabalhos experimentais, que incluiu a formulação da mistura pretendida, estudando diferentes percentagens de betume, e a elaboração de 12 provetes Marshall, 4 com 6% de betume, 4 com 6,5% de betume e os restantes 4 com 7% de betume. A percentagem ótima de betume a utilizar nesta mistura foi determinada pela análise da porosidade em provetes Marshall, adotando o método utilizado na Alemanha (Drüschner et al, 2000). De acordo com este método, foram compactados provetes Marshall com 50 pancadas por face, e a percentagem ótima de betume foi determinada para porosidades nos provetes entre 3% e 4%, optando-se o valor de 4% de porosidade.

Na formulação desta mistura foi necessário avaliar o escoamento de betume, de modo a aferir se a quantidade de fibras celulósicas introduzida é suficiente para evitar o escoamento e/ou exsudação do betume. O ensaio utilizado para avaliar o escoamento do betume foi o ensaio de *Schellenberg*.

Finalizado o fabrico de provetes, optou-se por realizar todo o processo de formulação Marshall, determinando as propriedades volumétricas da mistura e as suas variáveis Marshall.

Em termos gerais, da análise dos ensaios realizados nesta fase inicial, podem retirar-se as seguintes conclusões/apreciações:

- Para determinar a baridade aparente dos provetes realizados, e pelo facto de apresentarem uma superfície aberta e grosseira, foi necessário realizar a sua selagem com parafina líquida, impedindo a entrada de água para os poros com ligação à superfície, aumentando o rigor do ensaio;
- Apesar da percentagem ótima de betume, obtida através da formulação de provetes Marshall, ser de 6,3%, valor inferior ao mínimo aconselhado segundo a especificação alemã adotada neste trabalho, o ensaio de escoamento forneceu muito bons valores no que respeita ao valor de drenagem máxima;
- As propriedades volumétricas obtidas estão dentro do geralmente esperado para misturas SMA, de acordo com algumas orientações de especificações consideradas como referência;
- O facto da mistura em estudo ser temperada e incorporar MBR não acarreta diferenças significativas, do ponto de vista das propriedades volumétricas, comparativamente a outras misturas SMA fabricadas a quente e sem incorporação de subprodutos, o que representa uma mais-valia do ponto de vista ambiental e económico;

- Os valores de estabilidade Marshall obtidos foram relativamente baixos, situando-se entre 8 e 9 kN, valores próximos do limiar inferior do intervalo geralmente definido como aceitável para misturas tradicionais;
- É necessário alguma prudência nas conclusões que podem ser extraídas dos resultados dos ensaios de compressão de Marshall, uma vez que estes podem levar a considerar, erradamente, que as misturas SMA apresentam baixa resistência à deformação (Drüschner et al, 2000);
- A metodologia Marshall foi adotada neste trabalho por ser, atualmente, o ensaio de caracterização de misturas betuminosas mais utilizado em Portugal, apesar dos seus resultados não serem os mais adequados para caracterização de misturas do tipo SMA;
- O facto da mistura em estudo ser temperada tende a agravar a variabilidade nos resultados Marshall.

Numa segunda fase foram realizados ensaios laboratoriais que permitiram analisar o desempenho desta mistura, em relação à sensibilidade à água, ao módulo de rigidez e à deformação permanente.

Em termos gerais, da análise dos resultados obtidos podem retirar-se as seguintes conclusões/apreciações:

- Em termos de sensibilidade à água, a mistura em estudo, apresentou, em geral, um bom desempenho, com um valor de 88% para o parâmetro ITSR, o que traduz um comportamento satisfatório;
- Os módulos de rigidez obtidos foram bastante satisfatórios, tendo sido bastante visível a influência da percentagem de betume nos resultados;
- Os valores resultantes dos ensaios de wheel-tracking apresentam variabilidade; para lajetas com a mesma percentagem de betume obtiveram-se valores de deformação com diferença considerável;
- Os resultados obtidos em ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas traduziram um bom comportamento da mistura à deformação permanente, superior ao de misturas tradicionais, comprovando o referido na bibliografia existente sobre misturas do tipo SMA;
- O facto da mistura em estudo ser temperada e incorporar MBR não influenciou negativamente os valores obtidos nos ensaios de compressão uniaxial de cargas repetidas a avaliar pelos seus resultados satisfatórios.

5.2 Prosseguimentos de Trabalhos Futuros

No âmbito do desempenho estrutural, esta mistura deve ser alvo de uma avaliação mais extensa, recorrendo-se a um maior número de ensaios de wheel-tracking, para um maior número de lajetas formuladas com mesma percentagem de betume. A realização de outros ensaios que permitam avaliar o desempenho à deformação permanente será de todo o interesse, nomeadamente Ensaios Cíclicos de Compressão Triaxial.

Será ainda de interesse a realização de trechos experimentais, de modo a observar o comportamento deste tipo de misturas quando sujeitas a condições de solicitação reais. Relacionando posteriormente o seu comportamento com valores obtidos em laboratório. Esta correlação permitirá contribuir para ajustar os valores limites de ensaio para aceitação deste tipo de mistura.

5.3 Considerações Finais

Finalmente, tendo em conta os conhecimentos adquiridos durante o estudo efetuado e os resultados alcançados, pode considerar-se que os objetivos propostos foram atingidos. Numa primeira fase foi realizada uma síntese sobre o estado da arte das MBT assim como, revelados os aspetos mais importantes associados à incorporação de MBR em novas misturas e, numa segunda fase foi realizada uma revisão bibliográfica sobre misturas do tipo SMA.

Além destas revisões bibliográficas, que permitiram uma síntese de conhecimentos sobre estes temas, recorreu-se a trabalhos experimentais que permitiram obter alguns resultados relevantes acerca do comportamento de MBT, do tipo SMA com incorporação de MBR e fibras celulósicas. Embora muito haja por investigar neste âmbito, pode-se concluir que estas misturas têm potencial para futuramente constituir uma alternativa válida às misturas tradicionais.

A presente dissertação pretende também contribuir, mesmo que de forma modesta, para o aumento do interesse de futuros trabalhos nesta área, assim como para a inclusão de critérios ambientais e de promoção da sustentabilidade no desenvolvimento de “novas” misturas betuminosas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abreu, C. (2009). "Caracterização do desempenho de um Stone Mastic Asphalt". Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.

Alves, M. (2012). "Estudo do desempenho de materiais alternativos na pavimentação rodoviária – O caso das Misturas Betuminosas Temperadas". Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Antunes, M., L., Batista, F. (2009). "Reciclagem de pavimentos utilizando ligantes betuminosos", 2^{as} Jornadas Cepsa Betumes/CRP – Poupança: Energia e recursos naturais. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. http://www.crp.pt/docs/A25S2-02_M_Antunes_F_Batista.pdf (consultado em abril de 2014).

Barbosa, F. (2012). "Contribuição para o estudo do desempenho de misturas betuminosas temperadas". Dissertação para obtenção do Grau de Mestre. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa.

Baptista, A. (2006). "Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central – Contribuição para o seu estudo e aplicação". Dissertação para obtenção do Grau de Doutor. Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra.

Batista, F., Miranda, H., Antunes, M. L., Lanchas, S., Martinho, F. (2012). Apresentações T4 – "Aplicações de Misturas Betuminosas de Elevado Desempenho em Redes Viárias Urbanas". Jornadas LNEC – Engenharia para a Sociedade. Investigação e Inovação. Cidades e Desenvolvimento. Apresentações Posters/T4. LNEC. Lisboa 18-20 de junho de 2012. http://jornadas2012.lnec.pt/site_2_Cidades_e_Developimento/APRESENTACOES_POSTERS/T4_BATISTA_a115.pdf (consultado em abril de 2014).

Batista, F., Miranda, H., Antunes, M. L., Lanchas, S., Martinho, F. (2012). Resumos T4 – "Aplicações de Misturas Betuminosas de Elevado Desempenho em Redes Viárias Urbanas". Jornadas LNEC – Engenharia para a Sociedade. Investigação e Inovação. Cidades e Desenvolvimento. Apresentações Posters/T4. LNEC. Lisboa 18-20 de junho de 2012. http://jornadas2012.lnec.pt/site_2_Cidades_e_Developimento/RESUMOS/T4_BATISTA_r115.pdf (consultado em abril de 2014).

Blażejowski, K. (2011). "Stone Matrix Asphalt – Theory and Practice." CRC Press-Taylor e Francis Group.

Branco, F., Pereira, P., Picado-Santos, L. (2011). "Pavimentos Rodoviários". 4^a Reimpressão, Edições Almedina (ISBN 978-972-40-2648-0), Coimbra.

- Cao, W., Liu, S., Feng, Z. (2013).** “Comparison of performance of stone matrix asphalt mixtures using basalt and limestone aggregates” – *Construction and Building Materials*, 41, pp. 474-479.
- Capitão, S., Picado-Santos, L., Martinho, F. (2012).** “Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt.” – *Construction and Building Materials*, 36, pp. 1016-1024.
- DER-ST. (2007).** “Concreto Asfáltico Tipo SMA”. *ET-DE-P00/031*. Departamento de Estradas de Rodagem, São Paulo.
- Drüschner, L., Schäfer, V. (2000).** “Stone Mastic Asphalt”. German Asphalt Association, Bonn.
- EAPA. (1998).** “Heavy Duty Surfaces – The Arguments for SMA, European Asphalt Pavement Association.
- EAPA. (2007).** “Sustainable roads – Long-Life Asphalt Pavements – version for ‘bankers’”, Bruxelas, Bélgica.
- EAPA. (2010).** “The Use of Warm Mix Asphalt” – EAPA position paper. Bruxelas, Bélgica EAPA - European Asphalt Pavement Association.
http://www.eapa.org/usr_img/position_paper/llp_bankers_version2007.pdf (consultado a 17 de junho de 2014).
- EP. (2009).** “Caderno de Encargos Tipo Obra”, Estradas de Portugal.
- Ferreira, C. (2009).** “Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas”. Tese de Mestrado. Portugal: Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães.
- FHWA. (2008).** “Warm-Mix Asphalt: European Practice”. Federal Highway Administration – U.S. Department of Transportation. International Technology Scanning Program.
- FHWA. (2010).** “Warm Mix Asphalt Technologies and Research”. Federal Highway Administration – U.S. Department of Transportation.
<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>.
- Fonseca, P. (2011).** “Propriedades Volumétricas De Misturas Betuminosas (Com e Sem Fibras)”, Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto (FEUP), Porto.
- Fonseca, P., Guimarães, C., Gomes, V., Palha, D., Silva, H., Oliveira, J., Abreu, L. (2008).** “Estudo de Material Fresado para Incorporação em Misturas Betuminosas a Quente com Altas Taxas de Reciclagem”. II Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica. Universidade de Aveiro, 8-9 de maio de 2008.
- Gardete, D. (2006).** “Comparação de Ensaios Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente”. Tese de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Gardete, D., Picado – Santos, L. e Capitão, S. (2011).** “Formulação Volumétrica e Desempenho de Misturas Betuminosas Stone Mastic Asphalt”. XVI CILA – Congresso Ibero – Latinoamericano do Asfalto, 20-25 Novembro, 2011 – Rio de Janeiro - Brasil.
http://jornadas2012.lnec.pt/site_2_Cidades_e_Desenvolvimento/APRESENTACOES_POSTERS/T4_BATISTA_a115.pdf (consultado em 14 de maio de 2014).

- Gardete, D., Picado – Santos, L. e Capitão, S. (2013).** “Formulação Volumétrica de Misturas Betuminosas – Análise dos níveis de compactação para formulação de um AC20 e de um SMA”. http://www.crp.pt/docs/A45S134-29_Art_T5_7CRP_2013.pdf (consultado em abril 2014)
- Júnior, (2008).** “Revestimentos Asfálticos SMA”. 6º Encontro Técnico do Departamento de Estradas de Rodagem – Paraná, Betunel – Tecnologia em Asfaltos. www.der.pr.gov.br/arquivos/File/EncontrosTecnicos/.../SMADERPR.pdf. (consultado em abril 2014)
- Junquiá. (2013).** “Fibras de Celulose”. <http://www.valedojuquia.com.br/produtos/Fibra-de-celulose/> (consultado em abril 2014)
- Alibaba. (2014).** “Alibaba Granulado de Celulose de Fibra. Fibra de Celulose para a estrada SMA”. Maior Mercado de Exportação do Mundo. Fabricante: Shanghai Rongou Chemical Technology Co., Ltd. http://portuguese.alibaba.com/supplier_realcc_200948174/fibra-de-celulose-para-a-estrada-sma_212605860_1.html (consultado abril de 2014)
- InIR. (2009).** Ensaio de Comparação Interlaboratorial para Avaliação da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas Compactadas. Instituto de Infra - Estruturas Rodoviárias. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Martinho, F. (2014).** “Misturas Temperadas com Subprodutos Industriais – Caracterização e Validação Tecnológica”. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Martinho, F., Lanchas, S., Nunez, R., Batista, F., Miranda, H. (2013 a).** “A Experiência Portuguesa em Misturas Betuminosas do Tipo SMA com Fibras Celulósicas”. http://www.crp.pt/docs/A45S145-27_Art_T4_7CRP_2013.pdf (consultado em abril 2014)
- Martinho, F., Picado – Santos, L., Capitão, S. e Neves, J. (2013 b).** “Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas Contendo MBR”. http://www.crp.pt/docs/A45S134-14_Art_T5_7CRP_2013.pdf (consultado em abril 2014)
- Miranda, H., Batista, F., Antunes, M. L., Neves, J. (2013).** “Análise comparativa de métodos de ensaio para avaliação do escoamento, em misturas betuminosas do tipo Stone Mastic Asphalt, segundo a norma europeia EN 12697-18”. Artigo T5. 7º Congresso Rodoviário Português.
- MMAC. (2010).** “Mineralno-asfaltowe na cieplo”. <http://www.mmac.waw.pl/categories/gallery/19> (consultado em abril 2014)
- Mokhtari, A; Moghadas, N. (2012).** “Mechanistic approach for fiber and polymer modified SMA mixtures”. *Construction and Building Materials*. 36, pp. 381-390.
- Neves, J., Correia, A. (2006).** “Caracterização de Misturas Betuminosas em Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral de Provetas Cilíndricas”. *Revista Engenharia Civil*, artigo n.º 26, pág. 61-74. Universidade do Minho.
- Pereira, R. (2010).** “Misturas Betuminosas Temperadas: Estudos da Interação Aditivo – Ligante”. Dissertação para obtenção de Grau de Mestre. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro.

- Picado – Santos, L. (s.d.)** “O Futuro da Pavimentação” – 2º Seminário Engenharia Rodoviária. Departamento de Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- Prowell, B., Hurley, G., Frank, B. (2011).** “Warm – Mix Asphalt: Best Practices”, NAPA – National Asphalt Pavement Association, Second Edition, Lanham, MD – U.S.A.
- Prowell, B., Watson, D., Hurley, G., Brown, E. (2009).** “Evaluation of Stone Matrix Asphalt (SMA) for airfield pavements”, AAPT 04-04, Final Report, Prepared for Airfield Asphalt Pavement Technology Program Auburn University.
- Proyecto SMA (2014).** “Propuesta de Pliego de Prescripciones Técnicas de las Mezclas Bituminosas Tipo SMA”. Mezclas SMA sostenibles medioambientalmente amigables. <http://www.proyectosma.eu/> (consultado em setembro de 2014)
- Ramos, K. (2012).** “Estudo Sobre Mistura Asfáltica Tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) para Pavimento Aeroportuário”. Instituto Militar de Engenharia – Curso de Mestrado em Engenharia de Transportes, Rio de Janeiro.
- Sardão, E. (2012).** “Camadas de Desgaste Betuminosas com Incorporação de Seixo Britado – Análise de Alguns Parâmetros Relativos ao Atrito Superficial”. Dissertação apresentada para a obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.
- Silva, H., Palha, C., Gardete, D., Capitão, S. (2008).** “Study on the Consequences of Affixing the CE Marking To Bituminous Mixtures”. Proceedings of the 3rd European Pavement and Asset Management Conference, Coimbra, Portugal (CD-ROM).
- Silva, P. (2005).** “Estudo em Laboratório e em Campo de Misturas Asfálticas SMA 0/8S”. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.
- Toraldo, E.; Brovelli, C.; Mariani, E.(2013)** “Laboratory investigation into the effects of working temperatures on wax-based warm mix asphalt”. Construction and Building Materials, 44, pp. 774-780.
- Zaumanis, M. (2010).** “Warm Mix Asphalt Investigation”. Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark (Department of Civil Engineering) & Riga Technical University (Faculty of Civil Engineering Institute of Transportation) in cooperation with the Danish Road Institute. Master of Science Thesis.

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

EN 12697-12: 2008, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-18: 2004, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 18: Binder drainage. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-2: 2002+2010, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 2: Determination of particle size distribution. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-22: 2003 + A1: 2007, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel-Tracking. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-23: 2003, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-26: 2012, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stiffness. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-30: 2012, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 30: Specimen preparation, impact compactor. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-33: 2003+ A1:2007, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 33: Specimen prepared by roller compactor. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-34: 2012, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 34: Marshall test. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-35: 2004+2007, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 35: Laboratory mixing. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-39: 2012, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 39: Binder content by ignition. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-5: 2009, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 5: Determination of the maximum density. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-6: 2012, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 12697-8: 2003, Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Part 8: Determination of the void characteristics of bituminous specimens. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

EN 13108-5: 2006, Bituminous mixtures – Material specifications. Part 5: Stone Mastic Asphalt. Comissão Europeia de Normalização (CEN), Bruxelas.

NP EN 1097-6: 2003+A1: 2010, Determinação da massa volúmica e da absorção de água. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 13043: 2013, Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 13108-1:2011, Misturas betuminosas – Especificações dos materiais. Parte 1: Betão Betuminoso. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

NP EN 933-1: 2012, Ensaio das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

APÊNDICES

APÊNDICE I. Estudo dos Agregados

I.1 Análise granulométrica

Quadro I.1 – Valores obtidos da análise granulométrica do agregado da MBR – Amostra 1

Peneiro Malha (mm)	Massa (g)		Valores em %	
	Retidos	Retidos Acumulados	Retidos	Passados
16	0,0	0,0	0,0	100,0
14	9,4	9,4	0,4	99,6
12,5	15,0	24,4	1,0	99,0
10	146,8	171,2	7,1	92,9
8	181,2	352,4	14,7	85,3
6,3	176,0	528,4	22,0	78,0
4	225,8	754,2	31,4	68,6
2	334,5	1088,7	45,3	54,7
0,5	613,0	1701,7	70,8	29,2
0,125	414,5	2116,2	88,1	11,9
0,063	119,0	2235,2	93,0	7,0
Base	164,2			

Quadro I.2 – Valores obtidos da análise granulométrica do agregado da MBR – Amostra 2

Peneiro Malha (mm)	Massa (g)		Valores em %	
	Retidos	Retidos Acumulados	Retidos	Passados
16	0,0	0,0	0,0	100,0
14	10,5	10,5	0,4	99,6
12,5	20,8	31,3	1,1	98,9
10	111,9	143,2	4,8	95,2
8	160,5	303,7	10,3	89,7
6,3	180,0	483,7	16,4	83,6
4	258,9	742,6	25,1	74,9
2	424,8	1167,4	39,5	60,5
0,5	825,7	1993,1	67,5	32,5
0,125	581,5	2574,6	87,1	12,9
0,063	156,8	2731,4	92,5	7,5
Base	218,5			

Quadro I.3 – Valores obtidos da análise granulométrica do agregado da MBR – Amostra 3

Peneiro Malha (mm)	Massa (g)		Valores em %	
	Retidos	Retidos Acumulados	Retidos	Passados
16	0,0	0,0	0,0	100,0
14	0,0	0,0	0,0	100,0
12,5	22,7	22,7	1,0	99,0
10	85,5	108,2	4,7	95,3
8	104,5	212,7	9,2	90,8
6,3	143,1	355,8	15,4	84,6
4	179,6	535,4	23,1	76,9
2	340,3	875,7	37,8	62,2
0,5	663,3	1539,0	66,5	33,5
0,125	457,6	1996,6	86,3	13,7
0,063	129,8	2126,4	91,9	8,1
Base	184,1			

Quadro I.4 – Valores obtidos da análise granulométrica do agregado da MBR – Valores médios

Peneiro Malha (mm)	Amostra1	Amostra2	Amostra3	Média
16	100,0	100,0	100,0	100,0
14	99,6	99,6	100,0	99,7
12,5	99,0	98,9	99,0	99,0
10	92,9	95,2	95,3	94,5
8	85,3	89,7	90,8	88,6
6,3	78,0	83,6	84,6	82,1
4	68,6	74,9	76,9	73,5
2	54,7	60,5	62,2	59,1
0,5	29,2	32,5	33,5	31,7
0,125	11,9	12,9	13,7	12,8
0,063	7,0	7,5	8,1	7,5

Quadro I.5 – Valores obtidos da análise granulométrica do agregado da Fração 8/16 mm da MBR

Peneiro Malha (mm)	Massa (g)		Valores em %	
	Retidos	Retidos Acumulados	Retidos	Passados
16	0,0	0,0	0,0	100,0
14	0,0	0,0	0,0	100,0
12,5	20,2	20,2	9,4	90,6
10	83,9	104,1	48,4	51,6
8	110,8	214,9	100,0	0,0
6,3	0,0	214,9	100,0	0,0
4	0,0	214,9	100,0	0,0
2	0,0	214,9	100,0	0,0
0,5	0,0	214,9	100,0	0,0
0,125	0,0	214,9	100,0	0,0
0,063	0,0	214,9	100,0	0,0
Base	0,0			

Quadro I.6 – Valores obtidos da análise granulométrica do agregado da Fração 0/8 mm da MBR

Peneiro Malha (mm)	Massa (g)		Valores em %	
	Retidos	Retidos Acumulados	Retidos	Passados
16	0,0	0,0	0,0	100,0
14	0,0	0,0	0,0	100,0
12,5	0,0	0,0	0,0	100,0
10	0,0	0,0	0,0	100,0
8	0,0	0,0	0,0	100,0
6,3	144,3	144,3	7,3	92,7
4	189,2	333,5	16,9	83,1
2	336,1	669,6	33,9	66,1
0,5	656,6	1326,2	67,2	32,8
0,125	341,9	1668,1	84,6	15,4
0,063	161,7	1829,8	92,8	7,2
Base	143,0			

I.2 Estudo da mistura de agregados

Quadro I.7 – Mistura de agregados para a formulação da mistura betuminosa

Peneiro Abertura das malhas (mm)	16	14	12,5	10	8	6,3	4	2	0,5	0,125	0,063	Proporção na mistura
Brita 4/12,5	100	100	98,5	78	36,9	14	1	1	1	0	0	62,00%
Pó 0/4	100	100	100	100	100	100	100	86,7	51,9	23,3	14	10,00%
Fíler	100	100	100	100	100	100	100	100	100	93,7	72,1	8,00%
MBR 8/16	100	100	90,6	51,6	0	0	0	0	0	0	0	12,00%
MBR 0/8	100	100	100	100	100	92,7	83,1	66,1	32,8	15,4	7,2	8,00%
												100,00%
NP 13108-5 (Lim. Inf.)	100		90					20			5	
NP 13108-5 (Lim. Sup.)	100		100					35			13	
Curva de estudo	100	100	97,9	80,6	48,9	34,1	25,3	22,6	16,4	11,1	7,7	

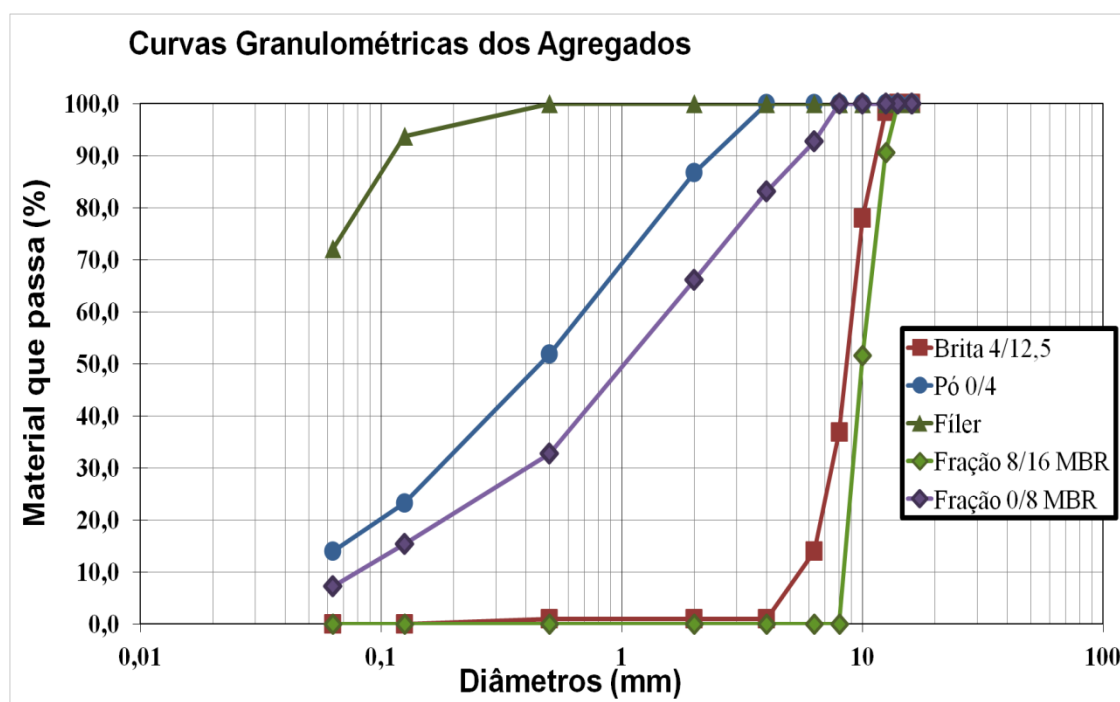


Figura I.1 - Curvas granulométricas dos agregados

I.3 Massa Volúmica

Para determinação da massa volúmica do agregado da MBR, fração 0/8 e fração 8/16, foram realizados ensaios com recurso a um picnómetro e a um cesto de rede metálica segundo a norma EN 1097-6. Nos quadros I.8 a I.13 apresentam-se os resultados obtidos.

Quadro I.8 - Determinação da massa volúmica dos agregados da fração 0/8 da MBR pelo método do picnómetro (partículas inferiores a 4 mm)

M2-massa da amostra mais picnómetro cheio de água (g):	1938,4
Temperatura da água (°C):	24,0
M3-massa do picnómetro cheio de água (g):	1643,4
M1-massa da amostra com superfície seca (g):	478,8
M4-massa da amostra seca em estufa (g):	472,8
Densidade da água para a temperatura de ensaio:	0,99740
Massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a):	2,653
Massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}):	2,566
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}):	2,599
Água absorvida (WA ₂₄):	1,278

Quadro I.9 - Determinação da massa volúmica dos agregados da fração 0/8 da MBR pelo método do cesto de rede metálica (partículas superiores a 4 mm)

M2-massa da amostra mais cesto imerso em água (g):	631,1
Temperatura da água (°C):	21,0
M3-massa do cesto vazio imerso em água após ensaio (g):	546,5
M1-massa da amostra seca com pano (g):	137,7
M4-massa da amostra seca em estufa (g):	137,5
Densidade da água para a temperatura de ensaio:	0,99810
Massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a):	2,594
Massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}):	2,585
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}):	2,588
Água absorvida (WA ₂₄):	0,145

Quadro I.10 - Massa volúmica dos agregados da fração 0/8 da MBR com ponderação dos valores obtidos para partículas inferiores e superiores a 4 mm

Massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a):	2,640
Massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}):	2,570
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}):	2,596
Água absorvida ($W_{A_{24}}$):	1,023

Quadro I.11 - Determinação da massa volúmica dos agregados da fração 8/16 da MBR pelo método do picnómetro (partículas inferiores a 4 mm)

M2- massa da amostra mais picnómetro cheio de água (g):	1938,5
Temperatura da água (°C):	20
M3-massa do picnómetro cheio de água (g):	1644,4
M1-massa da amostra com superfície seca (g):	477,6
M4-massa da amostra seca em estufa (g):	471,6
Densidade da água para a temperatura de ensaio:	0,99830
Massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a):	2,651
Massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}):	2,564
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}):	2,597
Água absorvida ($W_{A_{24}}$):	1,270

Quadro I.12 - Determinação da massa volúmica dos agregados da fração 8/16 da MBR pelo método do cesto de rede metálica (partículas superiores a 4 mm)

M2- massa da amostra mais cesto imerso em água (g):	886,9
Temperatura da água (°C):	19,5
M3-massa do cesto vazio imerso em água após ensaio (g):	584,0
M1-massa da amostra seca com pano (g):	497,4
M4-massa da amostra seca em estufa (g):	497,2
Densidade da água para a temperatura de ensaio:	0,99840
Massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a):	2,555
Massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}):	2,552
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}):	2,553
Água absorvida ($W_{A_{24}}$):	0,050

Quadro I.13 - Massa volúmica dos agregados da fração 8/16 da MBR com ponderação dos valores obtidos para partículas inferiores e superiores a 4 mm

Massa volúmica do material impermeável das partículas (ρ_a):	2,602
Massa volúmica das partículas secas em estufa (ρ_{rd}):	2,558
Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca (ρ_{ssd}):	2,574
Água absorvida (WA_{24}):	0,644

APÊNDICE II. Estudo da Mistura Betuminosa

II.1 Estudo de Mistura Betuminosa – Composição de Provetes Marshall e Lajetas para ensaio Wheel-tracking

Quadro II.1 – Composição dos provetes Marshall

Grupo de Amostras	(%) Betume	Massa Betume Novo (g)	% 4/16	Massa 4/16 (g)	% 0/4	Massa 0/4 (g)	% Fíler	Massa Fíler (g)	% MBR 0/8	Massa MBR 0/8 (g)	% MBR 8/16	Massa MBR 8/16 (g)	Total
1	6,0	59,3	62	698,0	10	112,6	8	90,1	8	96,0	12	144,0	1200
2	6,5	65,3		693,4		111,8		89,5		96,0		144,0	1200
3	7,0	71,3		688,7		111,1		88,9		96,0		144,0	1200
		Betume		4/16		0/4		Fíler		MBR 0/8		MBR 8/16	
Subtotal (g)		196,0		2080,1		335,5		268,4		288,0		432,0	3600
Total (g)*		783,9		8320,4		1342,0		1073,6		1152,0		1728,0	14400

* Para cada grupo foram fabricadas quatro amostras

Quadro II.2 – Composição das lajetas

Grupo de Amostras	(%) Betume	Massa Betume Novo (g)	% 4/16	Massa 4/16 (g)	% 0/4	Massa 0/4 (g)	% Fíler	Massa Fíler (g)	% MBR 0/8	Massa MBR 0/8 (g)	% MBR 8/16	Massa MBR 8/16 (g)	Total
1	6,0	546,1	62	6424,9	10	1036,3	8	829,0	8	883,6	12	1325,4	11045
2	6,5	601,3		6382,1		1029,4		823,5		883,6		1325,4	11045
3	7,0	656,5		6339,3		1022,5		818,0		883,6		1325,4	11045
		Betume		4/16		0/4		Fíler		MBR 0/8		MBR 8/16	
Subtotal (g)		1803,9		19146,2		3088,1		2470,5		2650,9		3976,3	33136
Total (g)*		3607,8		38292,4		6176,2		4941,0		5301,7		7952,6	66272

* Para cada grupo foram fabricadas duas amostras

No Quadro II.3 apresentam-se as massas volúmicas de cada material constituinte da mistura. Com base nas massas volúmicas de cada material apresentadas foram calculadas as baridades máximas teóricas, tendo em conta a massa de cada material na mistura. Ao mesmo tempo, foi realizado o ensaio com recurso ao picnómetro de vácuo, segundo a norma 12697-5.

Quadro II.3 – Massas volúmicas dos materiais utilizados na mistura

Massas Volúmicas	
Fração d/D	$\rho_{rd} \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Brita 4/12,5	2,600
Pó 0/4	2,620
Fíler	2,700
Agregado da MBR fração 0/8 mm	2,570
Agregado da MBR fração 8/16 mm	2,558
Betume	1,030

II.2 Estudo de Mistura Betuminosa – Propriedades Volumétricas

Quadro II.4 – Características Volumétricas dos provetes Marshall

Provete	Betume (%)	Altura do provete (mm)					Massa do Provete (g)			Temp. Água (°C)	Densidade da Água (kg/m³)	Baridade (kg/m³)	Baridade Média (kg/m³)
							Pesado ao ar	Selado Com Parafina	Imerso em Água Após Selagem				
2.1	6,00%	63,00	63,00	62,90	63,30	63,05	1130,5	1154,1	635,9	24,0	997,4	2295	2275
2.2	6,00%	66,30	66,50	66,80	66,60	66,55	1153,2	1183,8	641,2	24,0	997,4	2265	
2.3	6,00%	66,40	66,30	66,90	66,90	66,63	1165,3	1206,2	649,8	24,0	997,4	2280	
2.4	6,00%	66,00	65,80	66,60	65,90	66,08	1154,1	1184,8	640,5	24,0	997,4	2260	
3.1	6,50%	66,60	66,50	66,50	66,60	66,55	1169,8	1201,9	654,9	25,0	997,1	2285	2282
3.2	6,50%	62,00	61,70	61,50	61,70	61,73	1110,5	1146,5	622,2	25,0	997,1	2291	
3.3	6,50%	63,00	62,90	62,40	62,40	62,68	1090,3	1121,6	605,9	25,0	997,1	2265	
3.4	6,50%	60,00	59,50	59,40	60,10	59,75	1057,3	1094,0	591,3	25,0	997,1	2287	
4.1	7,00%	62,70	62,40	62,20	63,10	62,60	1119,6	1150,4	632,2	25,0	997,1	2311	2302
4.2	7,00%	65,30	65,70	65,90	65,40	65,58	1147,7	1184,7	641,6	25,0	997,1	2284	
4.3	7,00%	66,80	66,70	66,40	66,40	66,58	1181,1	1218,6	662,3	25,0	997,1	2293	
4.4	7,00%	63,70	63,80	63,00	63,20	63,43	1160,4	1191,7	656,9	25,0	997,1	2318	

Quadro II.5 – Características dos provetes Marshall

Proвете	Betume (%)	Baridade Máxima Teórica (cálculo) (kg/m ³)	Baridade Máxima Teórica (picnómetro) (kg/m ³)	Porosidade (%)	VMA (%)	VMA (%)	VFB (%)	VFB (%)
2.1	6,00%	2383	2390	5,2%	18,6%	18,48%	71,91%	71,73%
2.2	6,00%				18,4%		71,64%	
2.3	6,00%				18,5%		71,77%	
2.4	6,00%				18,4%		71,60%	
3.1	6,50%	2366	2334	3,0%	17,4%	17,38%	82,89%	82,87%
3.2	6,50%				17,4%		82,92%	
3.3	6,50%				17,3%		82,76%	
3.4	6,50%				17,4%		82,90%	
4.1	7,00%	2350	2363	1,9%	17,6%	17,55%	89,15%	89,11%
4.2	7,00%				17,4%		89,04%	
4.3	7,00%				17,5%		89,08%	
4.4	7,00%				17,7%		89,18%	

II.3 Estudo de Mistura Betuminosa – Compressão de Marshall

Quadro II.6 – Resultados do ensaio de Compressão de Marshall

Provete	Betume (%)	Estabilidade corrigida (kN)	Estabilidade corrigida (kN)	Deformação (mm)	Deformação média (mm)
2.2	6,00%	9,00	8,23	4,50	4,50
2.3	6,00%	7,10		4,80	
2.4	6,00%	8,60		4,20	
3.2	6,50%	9,10	8,97	4,00	4,20
3.3	6,50%	8,60		4,30	
3.4	6,50%	9,20		4,30	
4.1	7,00%	8,20	7,73	3,30	5,60
4.2	7,00%	7,30		4,20	
4.3	7,00%	7,70		9,30	

II.4 Estudo de Mistura Betuminosa – Sensibilidade à água

O estudo da mistura betuminosa, formulada para verificação da sensibilidade à água, encontra-se abaixo apresentado. Os provetes Marshall foram fabricados com o teor ótimo em betume.

Quadro II.7 – Composição dos provetes Marshall

Grupo de Amostras	(%) Betume	Massa Betume Novo (g)	% 4/16	Massa 4/16 (g)	% 0/4	Massa 0/4 (g)	% Fíler	Massa Fíler (g)	% MBR 0/8	Massa MBR 0/8 (g)	% MBR 8/16	Massa MBR 8/16 (g)	Total
1	6,3	63,0	62,0	695,2	10,0	112,1	8,0	89,7	8,0	96,0	12,0	144,0	1200
		Betume		4/16		0/4		Fíler		MBR 0/8		MBR 8/16	
Total (g)*		504,0		5561,6		896,8		717,6		768,0		1152,0	9600

* Para cada grupo foram fabricadas oito amostras

Os quadros II.8 e II.9 apresentam as características dos provetes a ensaiar e os resultados obtidos dos ensaios de tração indireta respetivamente.

Quadro II.8 – Características dos provetes Marshall para o ensaio de avaliação da sensibilidade à água

Proвете	Betume (%)	Geometria		Massa do Proвете (g)					
		Altura Média (mm)	Diâm. (mm)	Pesado ao ar	Selado Com Parafina	Imerso em Água Após Selagem	Temp. Água (°C)	Densidade da Água (kg/m ³)	Baridade (kg/m ³)
sa1	6,30%	65,7	101,5	1144,1	639,0	1185,3	24,5	997,3	2284,2
sa2	6,30%	65,6	101,5	1183,6	666,3	1218,8	24,5	997,3	2303,0
sa3	6,30%	65,4	101,5	1170,4	657,7	1211,0	24,5	997,3	2301,3
sa6	6,30%	65,6	101,5	1171,7	659,9	1210,4	24,5	997,3	2306,8
sa7	6,30%	66,6	101,5	1178,8	660,0	1213,1	24,0	997,4	2286,8
sa8	6,30%	64,7	101,5	1170,8	660,2	1203,5	24,0	997,4	2307,1

Quadro II.9 – Resultados do ensaio de tração indireta e determinação de ITRS

Grupos	Provetes "a seco"			Provetes "imersos"		
Características dos provetes	sa1	sa2	sa3	sa6	sa7	sa8
Massa do provete (arredondado a 0,1g)	1144,1	1183,6	1170,4	1171,7	1178,8	1170,8
Diâmetro do provete (arredondado a 0,1mm)	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5
Altura do provete (arredondado a 0,1 mm)	65,7	65,6	65,4	65,6	66,6	64,7
Altura média (mm)	65,6			65,6		
Diferença entre a altura média dos dois grupos (arredondada a 0,1 mm) não deve exceder os 5mm	0,1					
Volume geométrico do provete (cm ³)	531,6	530,8	529,2	530,8	538,9	523,5
Baridade geométrica média (g/cm ³)	2,152	2,230	2,212	2,208	2,188	2,237
Massa do provete imerso em água (arredondado a 0,1g)	639,0	666,3	657,7	659,9	660,0	660,2
Massa provete com parafina	1185,3	1218,8	1211,0	1210,4	1213,1	1203,5
Valor de K para correção	1,00015	1,00015	1,00015	1,00015	1,0003	1,0003
Baridade imersa (g/cm ³)	2,284	2,303	2,301	2,307	2,287	2,307
Baridade imersa média (g/cm ³)	2,296			2,300		
A diferença da baridade imersa média dos dois grupos de provetes (g/cm ³) não deve exceder os 0,015 g/cm ³ (15 kg/m ³)	0,004					

Quadro II.9 (Continuação) – Resultados do ensaio de tração indireta e determinação de ITRS

Grupos	Provetes "a seco"			Provetes "imersos"		
Características dos provetes	sa1	sa2	sa3	sa6	sa7	sa8
Características dos provetes depois de vácuo						
Diâmetro do provete (arredondado a 0,1mm)	---	---	---	101,5	101,5	101,5
Altura do provete (arredondado a 0,1 mm)	---	---	---	65,6	66,6	64,7
Volume do provete (cm ³)	---	--	---	530,8	538,9	523,5
O aumento do volume dos provetes após o vácuo não deve exceder 2%	NA			531,0 (g/cm ³)		
				1,0 %		
Ensaio de tração indireta EN 12697-23						
Tempo de condicionamento (h)	2h a 25°C			68 a 72h a 40°C e 2h a 25°C		
Temperatura de ensaio (°C)	25°C					
Resistência máxima (kN)	9,8	10,9	12,0	10,1	8,9	9,7
Resistência média (kN)	10,9			9,6		
Tração indireta ITS (GPa)	0,00094	0,00104	0,00115	0,00097	0,00084	0,00094
Tração indireta média ITS (GPa)	0,001043			0,000915		
Tração indireta média ITS (kPa)	1043			915		
Resistência Conservada em Tração Indireta ITRS (%)	88%					

II.5 Estudo de Mistura Betuminosa – Características das lajetas

Quadro II.10 – Características das lajetas realizadas

Lajeta	Betume (%)	Massa ar (g)	Dimensões (mm)			Baridade geométrica (kg/m ³)
L1	6,0%	10809,2	295,0	402,0	42,0	2170,18
L2	6,0%	10837,0	299,0	402,0	43,0	2096,73
L3	6,5%	10903,1	299,0	403,0	41,0	2206,94
L4	6,5%	10782,5	298,0	403,0	42,0	2137,71
L5	7,0%	11051,1	297,0	403,0	44,0	2098,41
L6	7,0%	10783,5	298,0	403,0	43,0	2088,19

APÊNDICE III. Resultados Gráficos

III.1 Estabilidade Marshall

MISTURAS BETUMINOSAS - Ensaio de Marshall (Norma de Ensaio EN 12697 - 34: 2004 + A1: 2007)

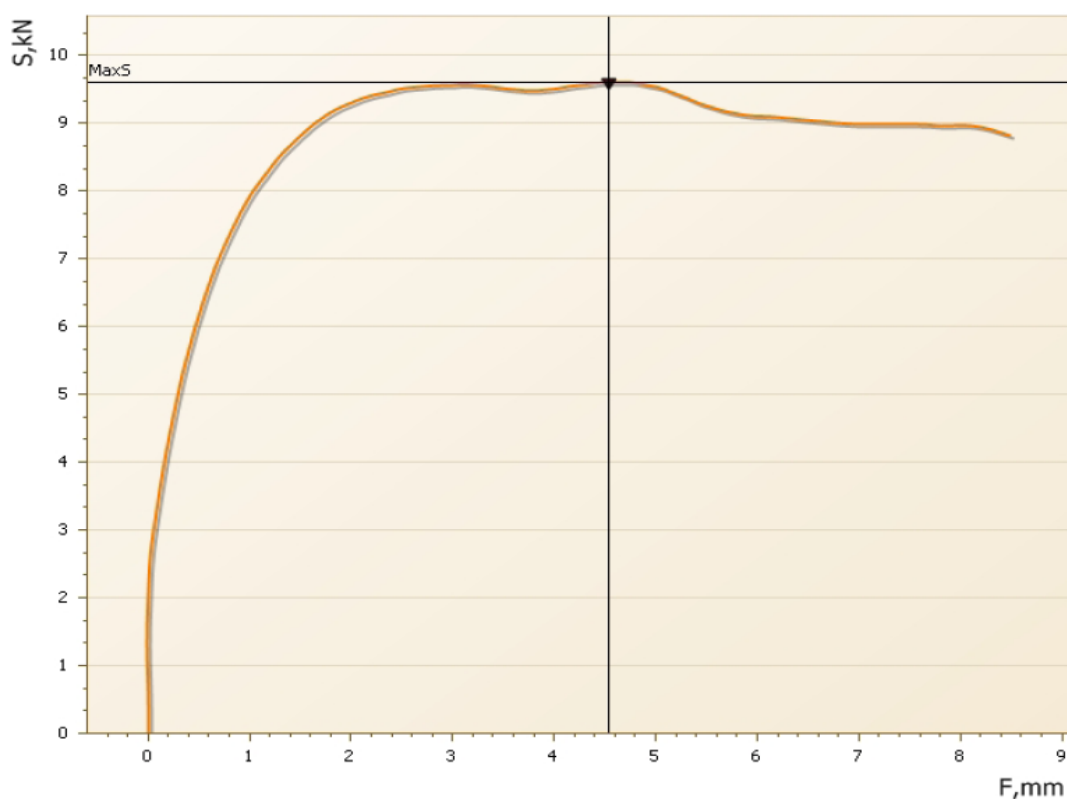


Figura III.1 – Estabilidade Marshall Provet 2.2 – Percentagem de betume 6,0%

Resultados:

Estabilidade Marshall: 9.6 kN

Fator de correção (c): 0,941 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 9,0 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,5 mm



Associação para o Desenvolvimento da Engenharia Civil
LPAV - Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Ficha de Ensaio

Versão 01

Junho/14

FE06

MISTURAS BETUMINOSAS - Ensaio de Marshall

(Norma de Ensaio EN 12697 - 34: 2004 + A1: 2007)

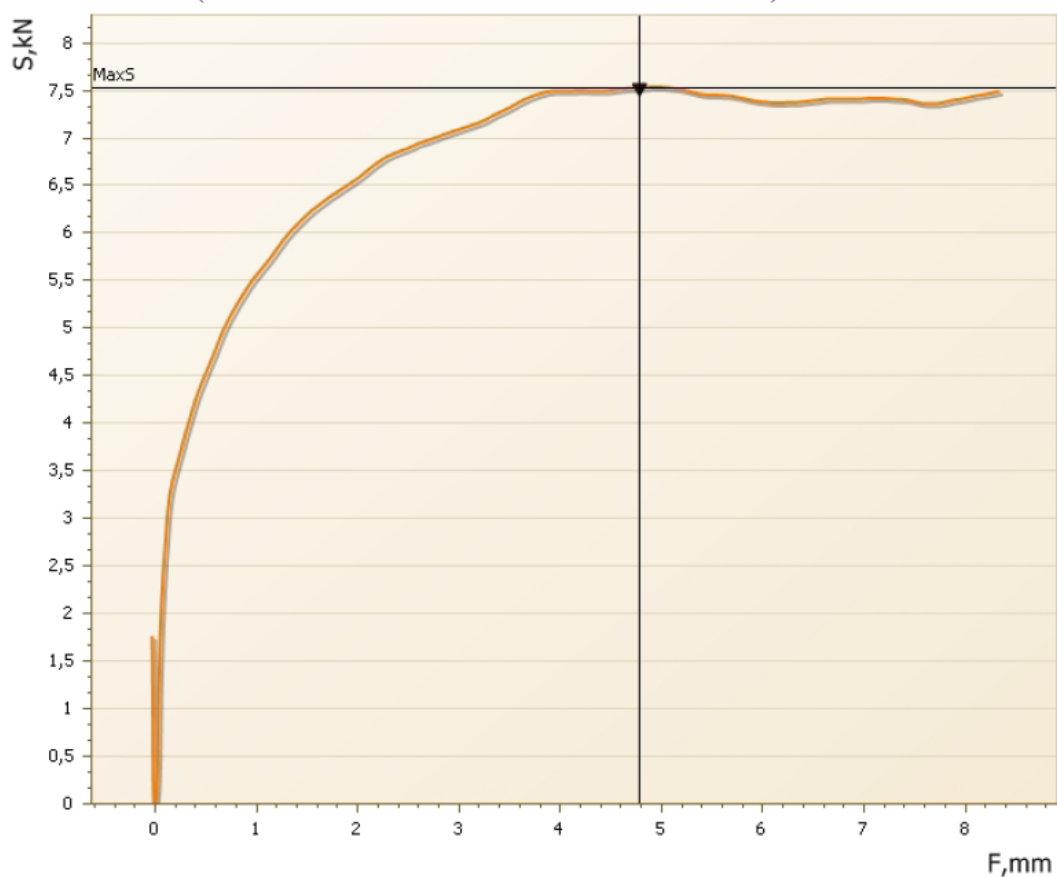


Figura III.1 – Estabilidade Marshall Provete 2.3 – Percentagem de betume 6,0%

Resultados:

Estabilidade Marshall: 7,5 kN

Fator de correção (c): 0,939 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 7,1 kN

Deformação Marshall Nominal (F_n): 4,8 mm



Associação para o Desenvolvimento da Engenharia Civil
LPAV - Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Ficha de Ensaio

Versão 01

Junho/14

FE06

MISTURAS BETUMINOSAS - Ensaio de Marshall

(Norma de Ensaio EN 12697 - 34: 2004 + A1: 2007)

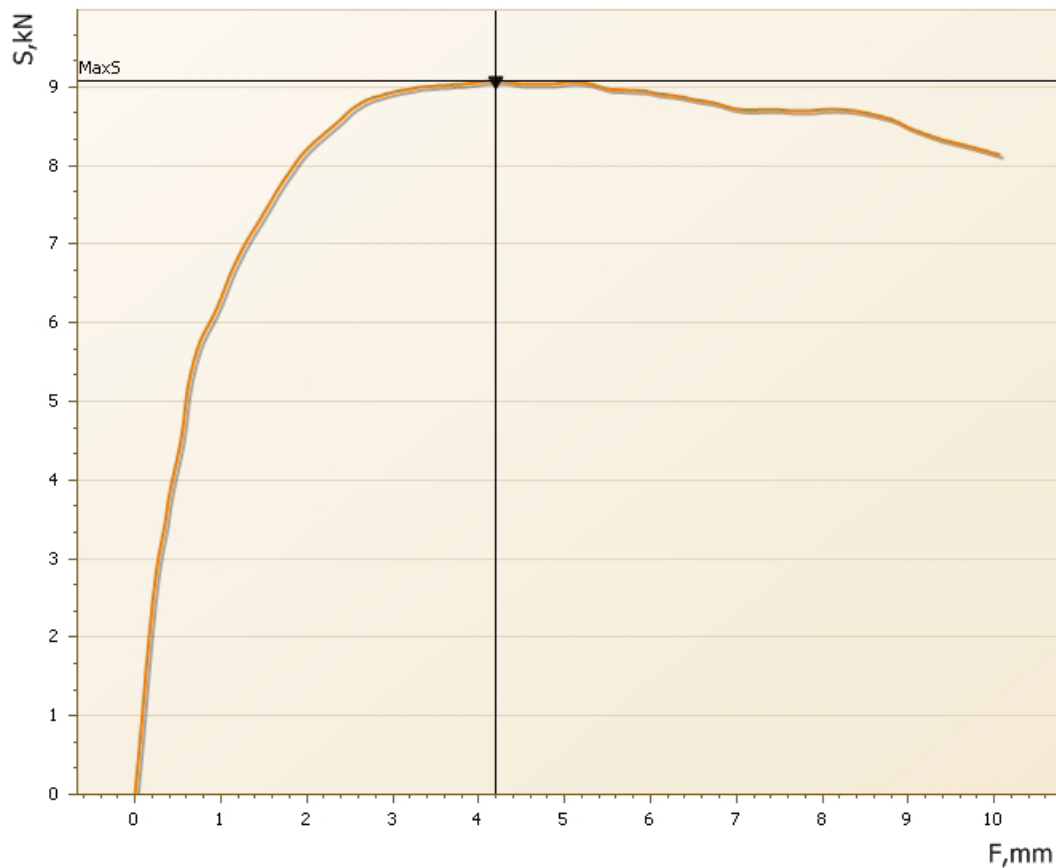


Figura III.2 – Estabilidade Marshall Provete 2.4 – Percentagem de betume 6,0%

Resultados:

Estabilidade Marshall: 9,1 kN

Fator de correção (c): 0,953 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 8,6 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,2 mm



Associação para o Desenvolvimento da Engenharia Civil
LPAV - Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Ficha de Ensaio

Versão 01

Junho/14

FE06

MISTURAS BETUMINOSAS - Ensaio de Marshall

(Norma de Ensaio EN 12697 - 34: 2004 + A1: 2007)

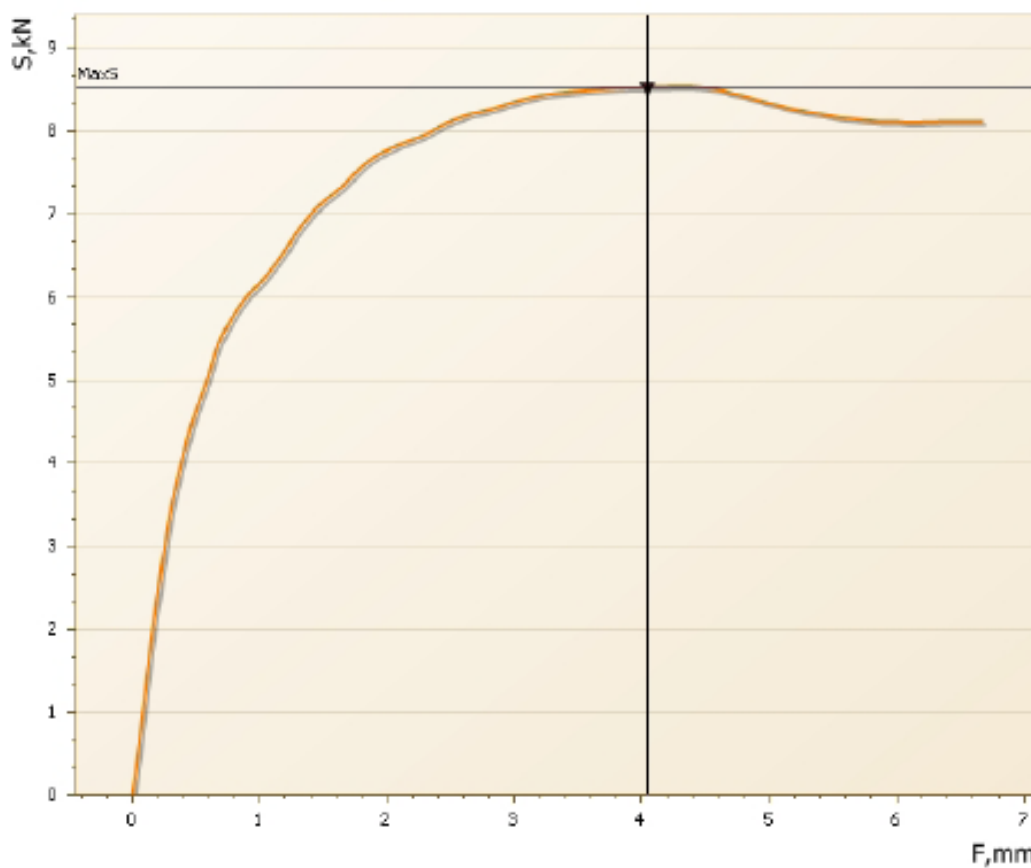


Figura III.3 – Estabilidade Marshall Provete 3.2 – Percentagem de betume 6,5%

Resultados:

Estabilidade Marshall: 8,5 kN

Fator de correção (c): 1,066 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 9,1 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,0 mm



Associação para o Desenvolvimento da Engenharia Civil
LPAV - Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Ficha de Ensaio

Versão 01

Junho/14

FE06

MISTURAS BETUMINOSAS - Ensaio de Marshall

(Norma de Ensaio EN 12697 - 34: 2004 + A1: 2007)

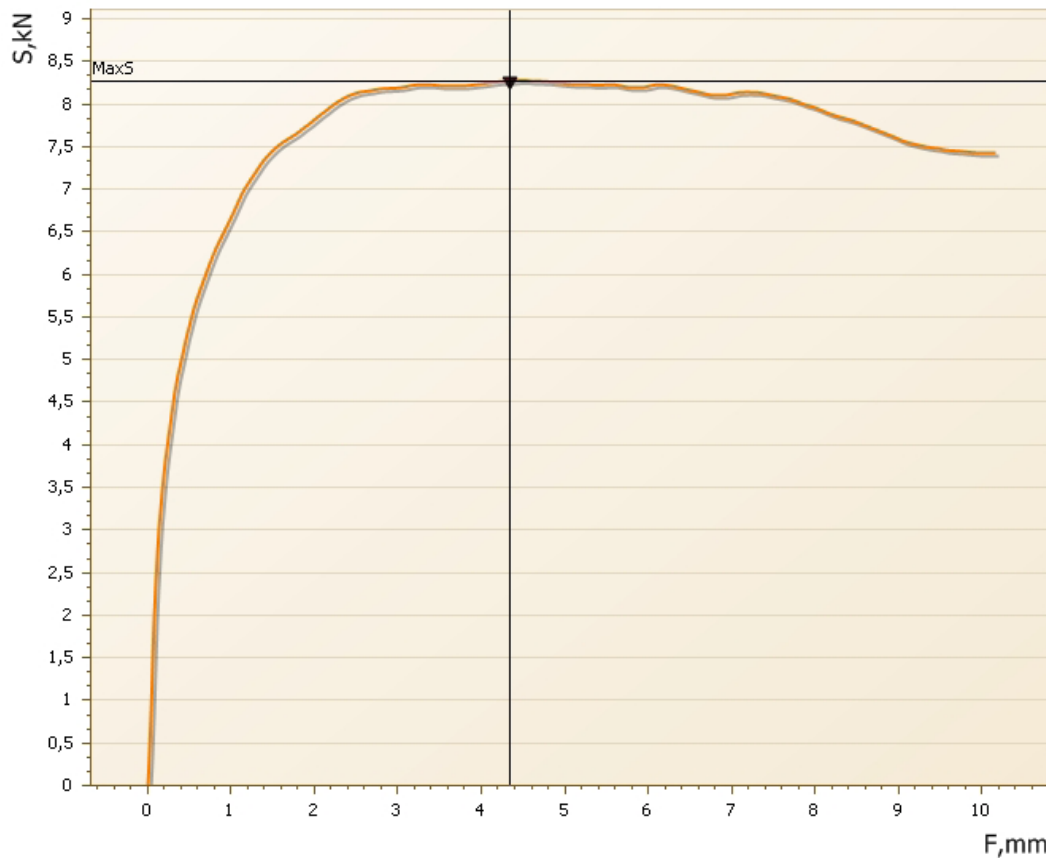


Figura III.4 – Estabilidade Marshall Provete 3.3 – Percentagem de betume 6,5%

Resultados:

Estabilidade Marshall: 8,3 kN

Fator de correção (c): 1,040 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 8,6 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,3 mm



Associação para o Desenvolvimento da Engenharia Civil
LPAV - Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Ficha de Ensaio

Versão 01

Junho/14

FE06

MISTURAS BETUMINOSAS - Ensaio de Marshall

(Norma de Ensaio EN 12697 - 34: 2004 + A1: 2007)

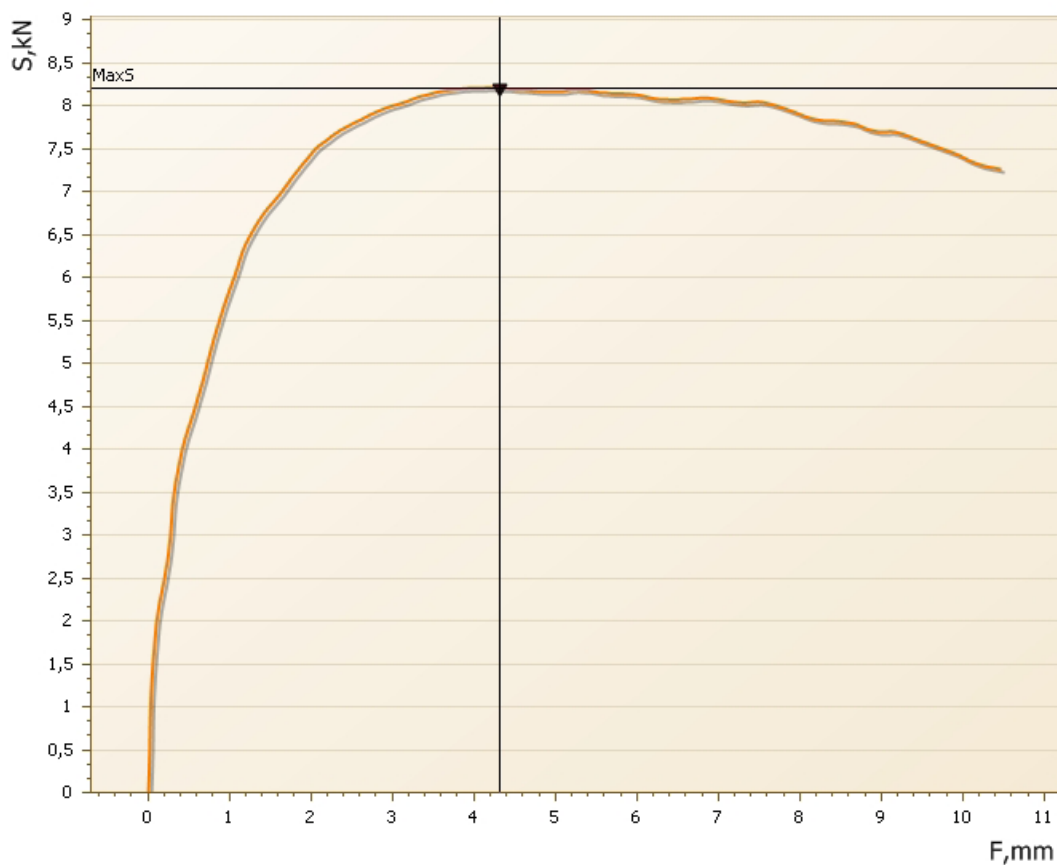


Figura III.5 – Estabilidade Marshall Provete 3.4 – Percentagem de betume 6,5%

Resultados:

Estabilidade Marshall: 8,2 kN

Fator de correção (c): 1,122 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 9,2 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,3 mm



Associação para o Desenvolvimento da Engenharia Civil
LPAV - Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Ficha de Ensaio

Versão 01

Junho/14

FE06

MISTURAS BETUMINOSAS - Ensaio de Marshall

(Norma de Ensaio EN 12697 - 34: 2004 + A1: 2007)

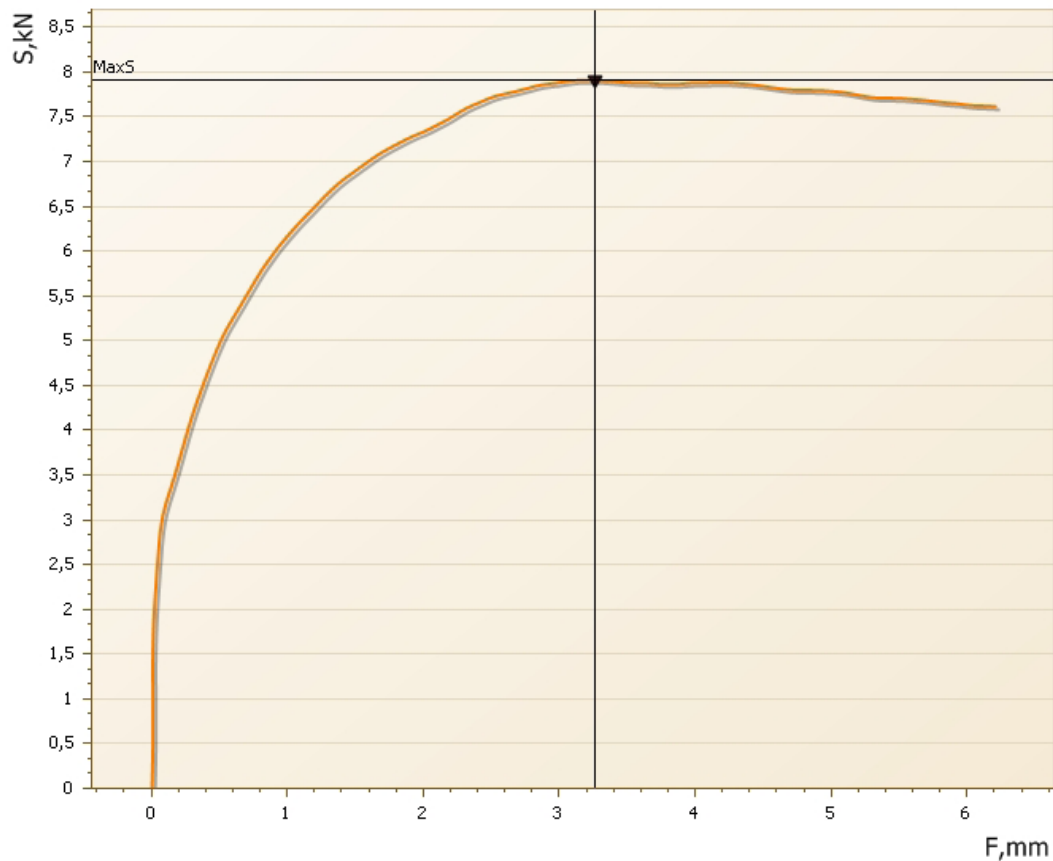


Figura III.6 – Estabilidade Marshall Provete 4.1 – Percentagem de betume 7,0%

Resultados:

Estabilidade Marshall: 7,9 kN

Fator de correção (c): 1,042 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 8,2 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 3,3 mm



Associação para o Desenvolvimento da Engenharia Civil
LPAV - Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Ficha de Ensaio

Versão 01

Junho/14

FE06

MISTURAS BETUMINOSAS - Ensaio de Marshall

(Norma de Ensaio EN 12697 - 34: 2004 + A1: 2007)

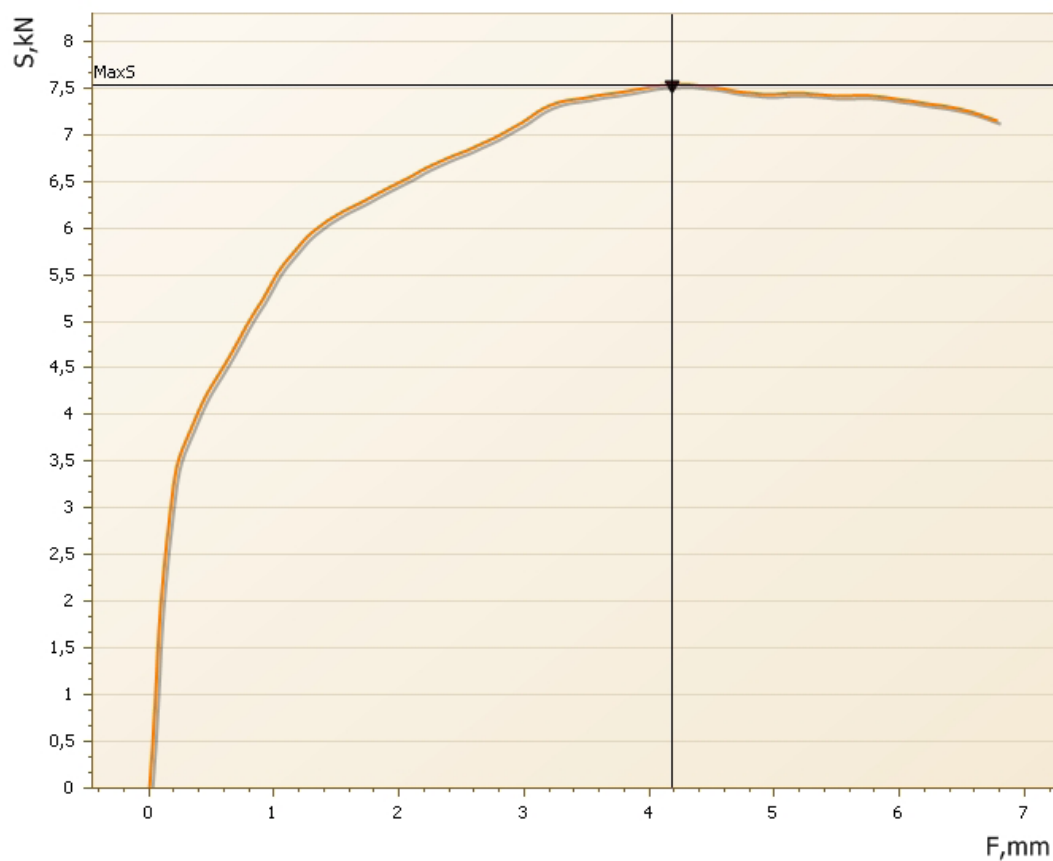


Figura III.7 – Estabilidade Marshall Provete 4.2 – Percentagem de betume 7,0%

Resultados:

Estabilidade Marshall: 7,5 kN

Fator de correção (c): 0,965 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 7,3 kN

Deformação Marshall Nominal (F_n): 4,2 mm



Associação para o Desenvolvimento da Engenharia Civil
LPAV - Laboratório de Mecânica de Pavimentos

Ficha de Ensaio

Versão 01

Junho/14

FE06

MISTURAS BETUMINOSAS - Ensaio de Marshall

(Norma de Ensaio EN 12697 - 34: 2004 + A1: 2007)

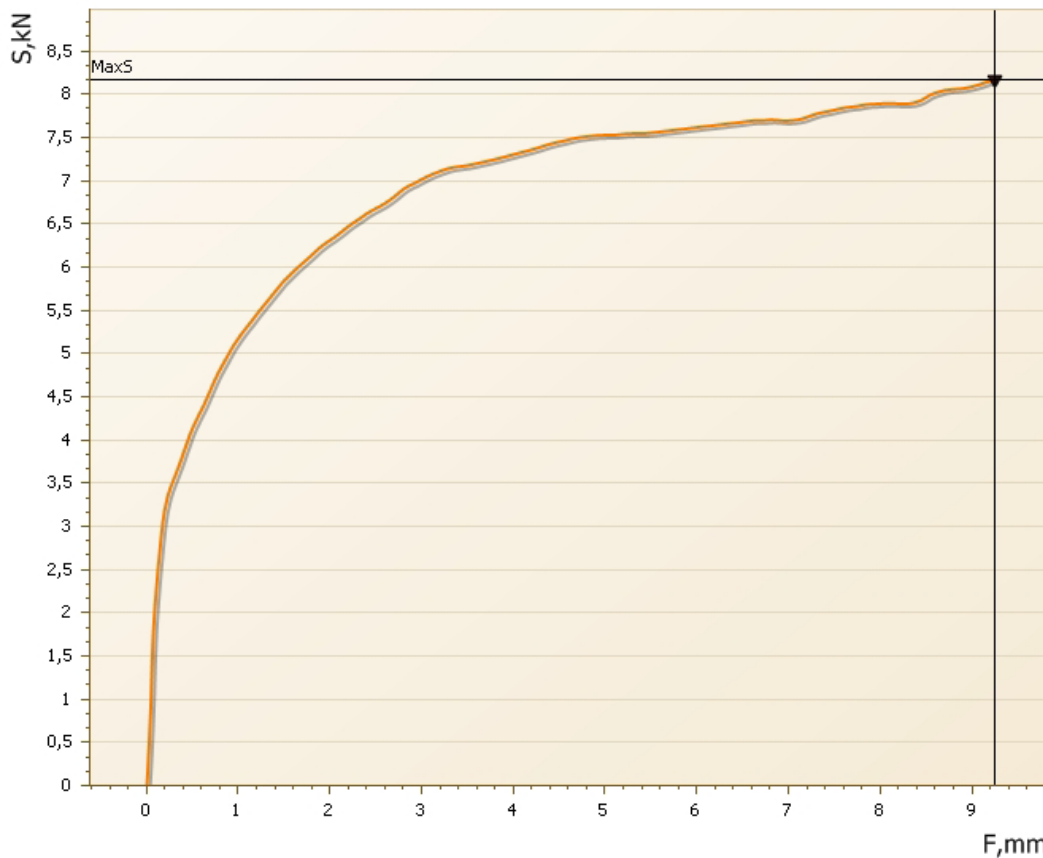


Figura III.8 – Estabilidade Marshall Provete 4.3 – Percentagem de betume 7,0%

Resultados:

Estabilidade Marshall: 8,2 kN

Fator de correção (c): 0,940 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 7,7 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 9,3 mm

III.2 Ensaios de Tração Indireta

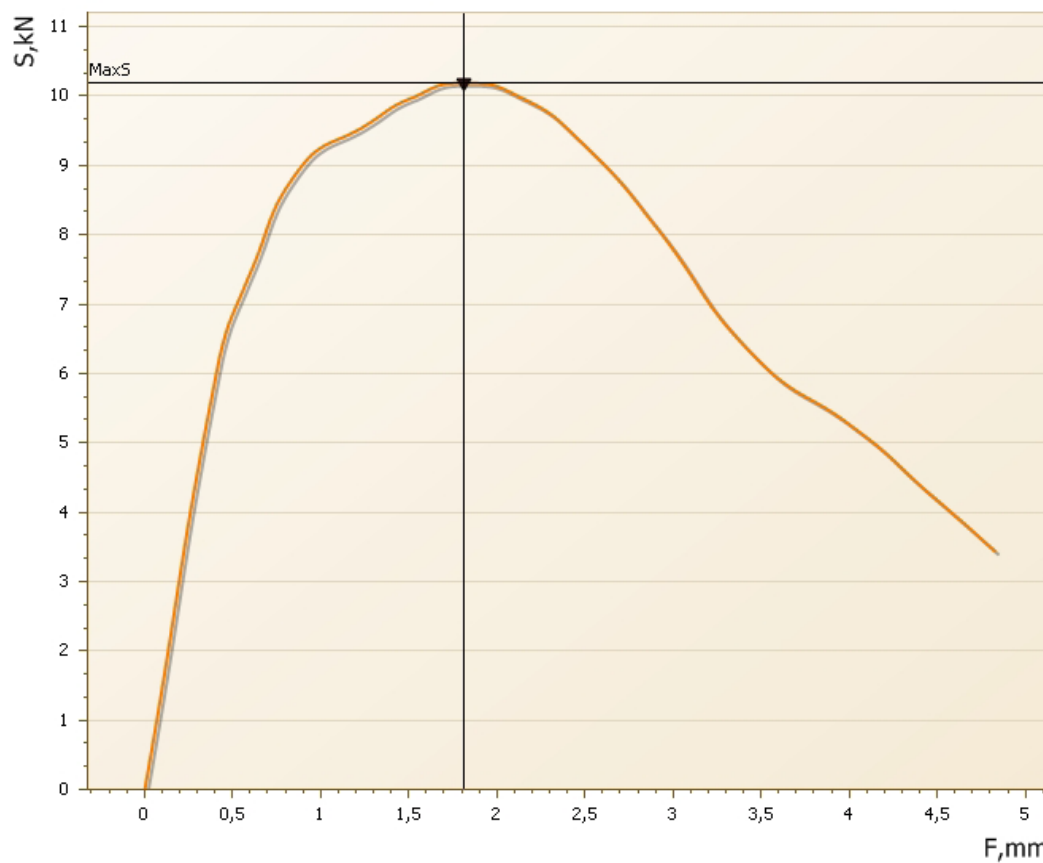


Figura III.9 – Tração Indireta em provete seco sa1 – Percentagem de betume 6,3 %

Resultados:

Estabilidade Marshall: 10,2 kN

Fator de correção (c): 0,962 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 9,8 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 1,8 mm

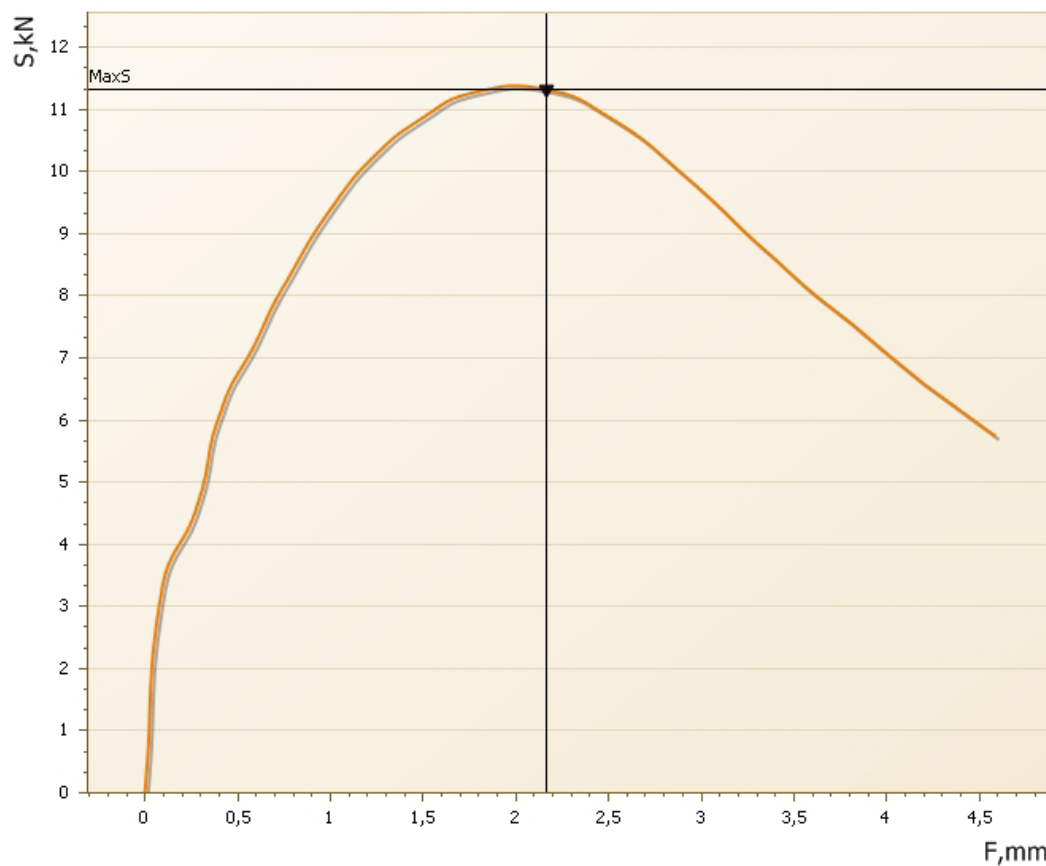


Figura III.10 – Tração Indireta em provete seco sa2 – Percentagem de betume 6,3 %

Resultados:

Estabilidade Marshall: 11,3 kN

Fator de correção (c): 0,964 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 10,9 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 2,2 mm

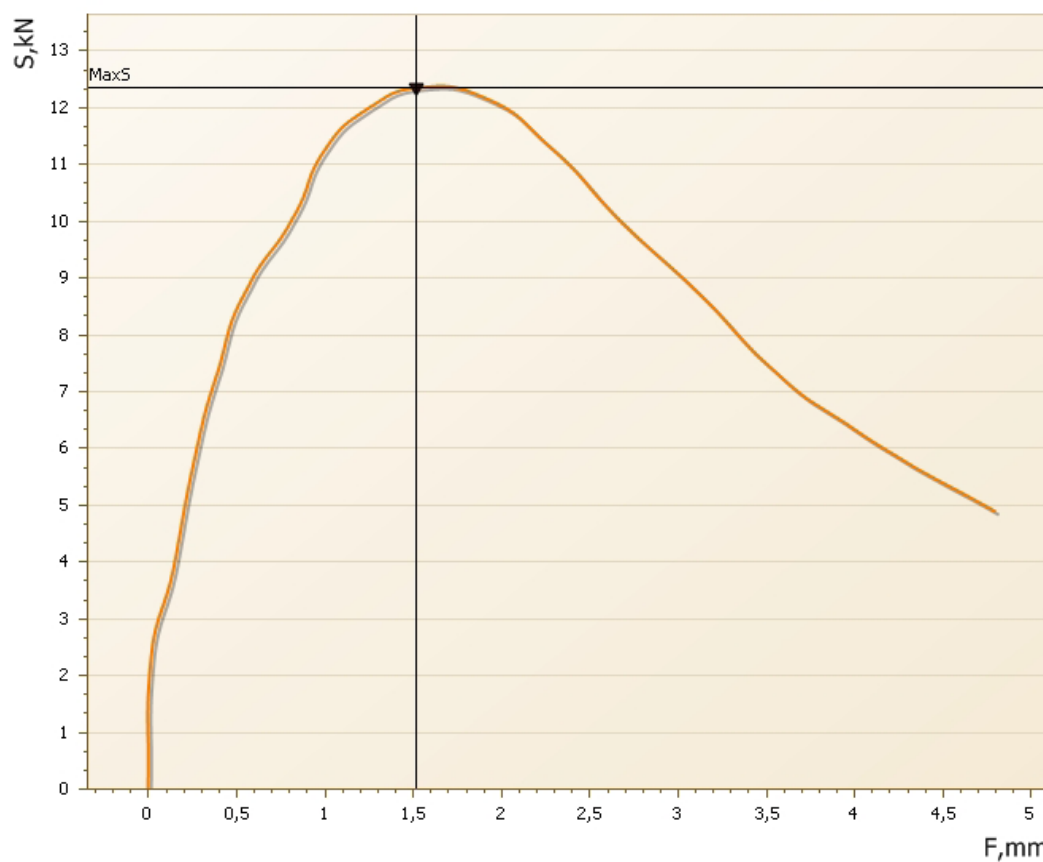


Figura III.11 – Tração Indireta em provete seco sa3 – Percentagem de betume 6,3 %

Resultados:

Estabilidade Marshall: 12,3 kN

Fator de correção (c): 0,969 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 12,0 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 1,5 mm

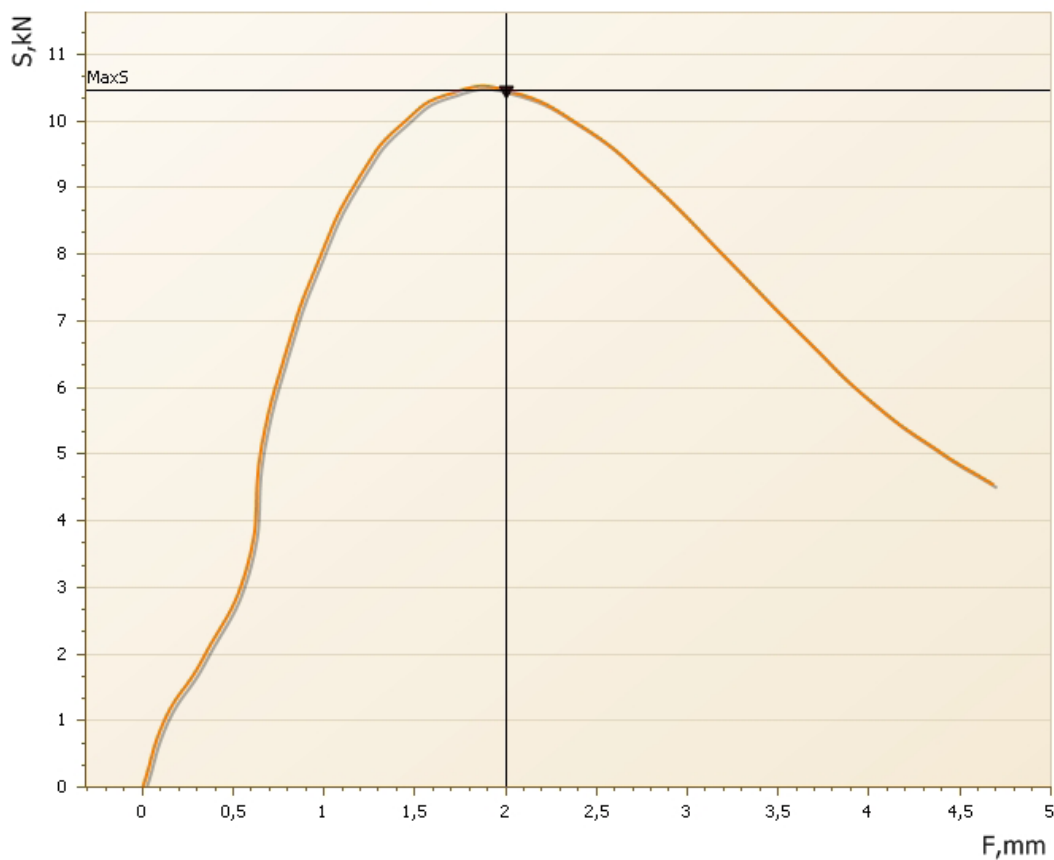


Figura III.12 – Tração Indireta em provete imerso sa6 – Percentagem de betume 6,3 %

Resultados:

Estabilidade Marshall: 10,5 kN

Fator de correção (c): 0,964 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 10,1 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 2,0 mm

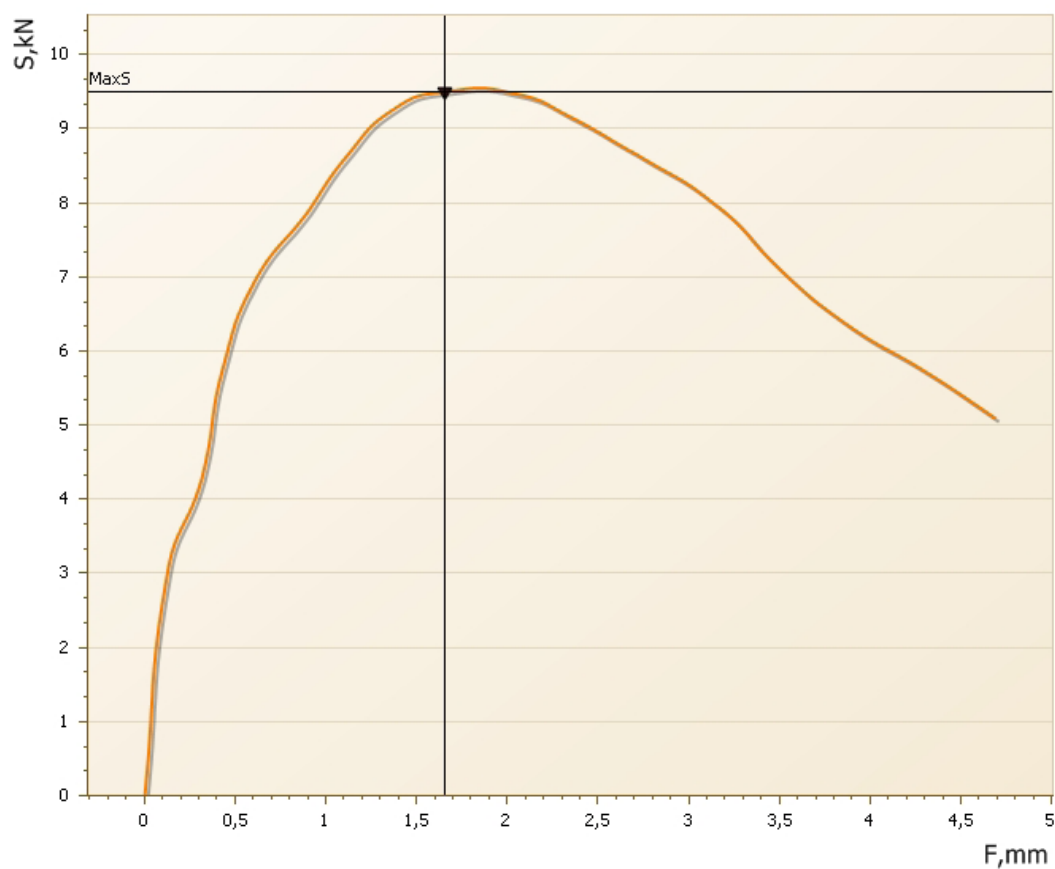


Figura III.13 – Tração Indireta em provete imerso sa7 – Percentagem de betume 6,3 %

Resultados:

Estabilidade Marshall: 9,5 kN

Fator de correção (c): 0,940 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 8,9 kN

Deformação Marshall Nominal (F_n): 1,7 mm

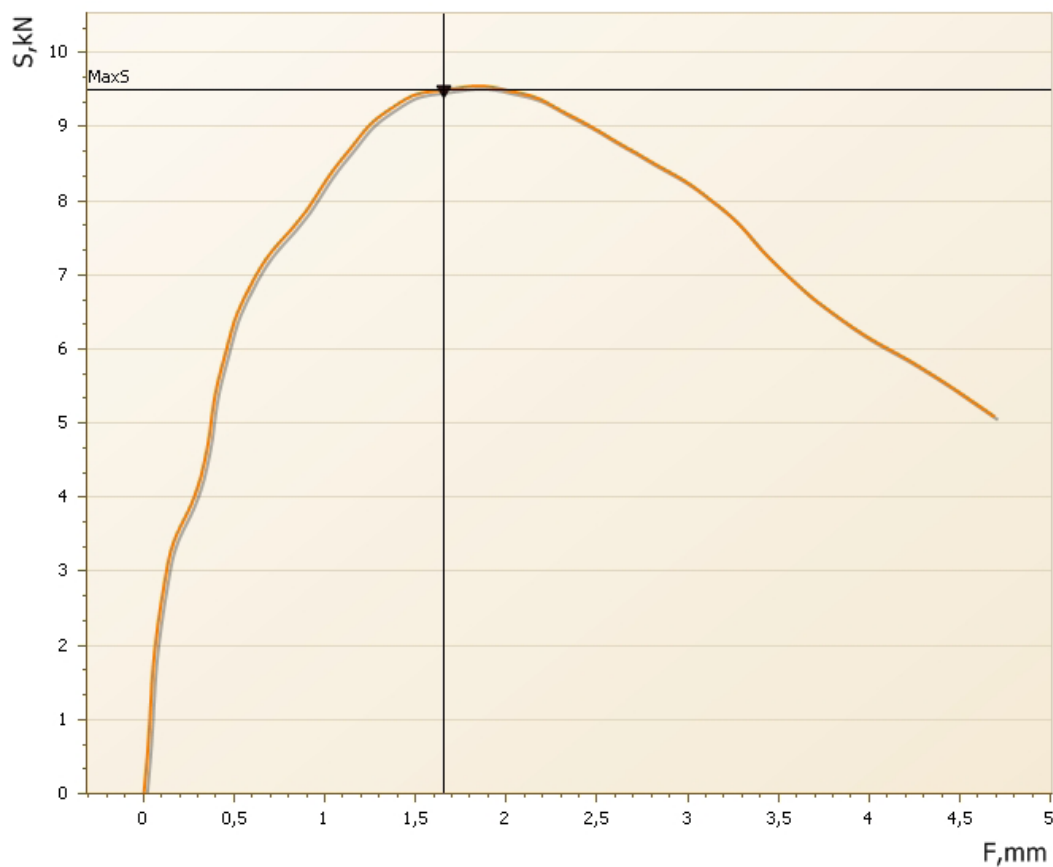


Figura III.14 – Tração Indireta em provete imerso sa8 – Percentagem de betume 6,3 %

Resultados:

Estabilidade Marshall: 9,8 kN

Fator de correção (c): 0,987 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 9,7 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 2,2 mm